

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS  
PARA EL CURADO DE CILINDROS DE CONCRETO HIDRÁULICO  
SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

**PRESENTA:**

**ZARETH LAIZ AMÍN JIMÉNEZ JESUS**

**DAVID ORDOÑEZ DEART**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**

**DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL BARRANQUILLA,**

**ATLÁNTICO**

**2021**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS PARA  
EL CURADO DE CILINDROS DE CONCRETO HIDRÁULICO SOBRE LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

**PRESENTA:**

**ZARETH LAIZ AMÍN JIMÉNEZ JESÚS DAVID ORDOÑEZ DEART**

**TRABAJO DE GRADO**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**ASESOR:**

**PhD. MICHEL JOHANA MURILLO ACOSTA**

**CO-ASESOR:**

**Esp. DANIEL ABUDINÉN ORDOÑEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**

**DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL INGENIERÍA CIVIL**

**BARRANQUILLA, ATLÁNTICO**

**2021**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Barranquilla, Atlántico, 2021

### **Dedicatoria**

Quiero dedicar este trabajo de grado primeramente a Dios y a mi familia por su invaluable asistencia durante mis estudios, inculcando buenos principios y valores para hacer de mí una persona de bien. También dedico este trabajo de grado a cada uno de mis maestros que me brindaron de su conocimiento y tiempo para ser de mí una gran profesional.

Zareth Laiz Amín Jiménez

Quiero dedicar este trabajo de grado a Dios, a mi madre y a mi familia, ya que ellos me inculcaron los principios y valores que me han permitido desarrollar de manera satisfactoria mi formación profesional. Este trabajo también va dedicado a todos los maestros que hicieron parte de mi desarrollo educativo, brindándome su tiempo y conocimiento para contribuir a mi crecimiento personal y profesional.

Jesús David Ordoñez Deart

### **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad de la Costa por servirme de apoyo para mi formación como profesional, por permitirme ser miembro de su institución en donde crecí académicamente convirtiéndome en una gran profesional de la ingeniería civil. Agradezco a cada uno de los docentes y administrativos que me brindaron su tiempo y conocimiento contribuyendo a mi crecimiento profesional. Gracias de todo corazón a la ingeniera Michel Murillo por darme el apoyo de tutora, una gran guía para esta investigación, a nuestro cotutor ingeniero Daniel Abudinén y a la ingeniera Mayra Del Río. Agradezco por su apoyo, gestión y tiempo en esta investigación. Mil gracias a la empresa Ultracem por prestarnos sus equipos, insumos e instalaciones para la realización del componente principal de este trabajo y sus laboratorios para culminar los ensayos correspondientes. Así mismo agradezco a mi compañero de tesis, equipo y excelente amigo Jesús Ordoñez por todo su apoyo, ayuda, conocimiento y gestión durante nuestra formación profesional y fundamentalmente en esta investigación para así consumir este proyecto de grado.

Zareth Laiz Amín Jiménez

Estoy y estaré profundamente agradecido con la Universidad de la Costa por permitirme hacer parte de su institución, y por su acompañamiento durante toda mi formación académica, convirtiéndome tanto en un ingeniero civil como en un ciudadano integral. También a los maestros que hicieron parte de mi desarrollo educativo, brindándome su tiempo y conocimiento para contribuir a mi crecimiento personal y profesional, con los cuales me siento profundamente agradecido, A la ingeniera Michel Murillo agradezco por brindar su apoyo como asesora para guiar y culminar esta investigación, a nuestro co-asesor, el ingeniero Daniel Abudinén y a la ingeniera Mayra Del Río por su apoyo incondicional en todo momento de este proceso investigativo. Doy gracias a la empresa Ultracem por prestar sus instalaciones, equipo y materia prima para la realización de las muestras y ensayos estipulados para esta investigación. Agradezco a mi compañera de tesis y gran amiga Zareth Amín por todo el aprendizaje obtenido

durante nuestro ciclo de preparación profesional, especialmente este proceso de investigación para culminar nuestro proyecto de grado.

Jesús David Ordoñez Deart

### Resumen

En este trabajo realizamos una investigación en donde se analizó la influencia sobre la resistencia a la compresión que tienen las técnicas empleadas para el curado de cilindros de concreto hidráulico, para así identificar las técnicas de curado que garantizan o contribuyen a mejores valores de resistencia a la compresión y que a su vez sea útil como recomendación para la mejor elección favoreciendo la conservación de la calidad en la construcción de las obras. El análisis se basó en la elaboración de 48 muestras cilíndricas de concreto con base en un diseño de mezcla para un concreto convencional, teniendo en cuenta la caracterización de los materiales y la normativa vigente. Posteriormente a la realización de la mezcla y fabricación de las muestras, se emplearon 8 técnicas diferentes de curado, siendo algunas las más comúnmente utilizadas en la industria y otras un poco más innovadoras: inmersión total en agua potable, inmersión total en agua con solución química (cal) y control de temperatura, inmersión total en agua de mar, agentes de curado, recubrimiento con láminas de polietileno, rociado de agua manual y sin curado. Para luego someter los cilindros a ensayos de compresión a las edades de 7 y 28 días. Con base en los resultados obtenidos se obtuvo un mayor valor de resistencia a la compresión en la técnica de forrado en polietileno, como también las técnicas de inundación total en agua de grifo, agua de mar y agua con cal y control de temperatura según la NTC 1377 y NTC 3512.

**Palabras clave:** Concreto hidráulico, resistencia a compresión, madurez del concreto, curado del concreto, técnicas de curado.



### **Abstract**

In this degree work we carried out an investigation where the influence on the compressive strength of the techniques used for curing hydraulic concrete cylinders was analyzed, in order to identify the curing techniques that guarantee or contribute to better compression resistance values and which in turn is useful as a recommendation for the best choice favoring the preservation of quality in the construction of works. The analysis was based on the preparation of 48 cylindrical concrete samples based on a mix design for conventional concrete, considering the characterization of the materials and current regulations. After mixing and manufacturing the samples, 8 different curing techniques were used, some being the most commonly used in the industry and others a little more innovative: total immersion in drinking water, total immersion in water with chemical solution (lime) and temperature control, full seawater immersion, curing agents, polyethylene sheet coating, manual water spray and no curing. Then apply compression tests to the cylinders at the ages of 7 and 28 days. Based on the results obtained, a higher value of compression resistance was obtained in the polyethylene lining technique, as well as the total flooding techniques in tap water, seawater and water with lime according to the NTC 1377 and NTC 3512.

**Keywords:** *Hydraulic concrete, compressive strength, concrete maturity, concrete curing, curing techniques.*

## Contenido

Lista de tablas y figuras.....	13
Tablas.....	17
Introducción.....	19
Planteamiento del problema.....	22
Justificación.....	23
Objetivos.....	24
4.1 Objetivo general.....	24
4.2 Objetivos específicos.....	24
Marco teórico-conceptual.....	24
5.1.1 Concreto hidráulico.....	24
5.1.1.1 Aditivos.....	25
5.1.1.2 Agregados.....	25
5.1.1.3 Agua.....	27
5.1.1.4 Cemento Portland.....	27
5.1.2 Curado del concreto.....	29
5.1.3 Madurez del concreto.....	30
5.1.4 Resistencia a la compresión del concreto.....	31
Estado del arte.....	31
Diseño metodológico.....	38
Desarrollo experimental.....	40
7.1 Selección de materiales.....	40
7.2 Caracterización de los materiales.....	41
7.2.1 Cemento Portland.....	41
7.2.2 Ceniza.....	43

7.2.2.1 Características físicas de la ceniza. ....	43
7.2.2.2 Características química de la ceniza. ....	44
7.2.3 Agregado fino. ....	45
7.2.3.1 Características físicas del agregado fino. ....	46
7.2.3.2 Porcentaje equivalente de arena agregado fino. ....	48
7.2.3.3 Porcentaje de partículas livianas agregado fino. ....	48
7.2.3.4 Porcentaje de partículas deleznales agregado fino. ....	49
7.2.3.5 Contenido de cloruros y sulfatos agregado fino. ....	50
7.2.4 Agregado grueso. ....	50
7.2.4.1 Características físicas agregado grueso. ....	51
7.2.4.2 Porcentaje de desgaste a la abrasión agregado grueso. ....	53
7.2.4.3 Porcentaje de partículas livianas agregado grueso. ....	54
7.2.3.4 Porcentaje de partículas deleznales agregado grueso. ....	54
7.2.5 Agua. ....	56
7.2.6 Aditivos. ....	56
7.2.6.1 Plastificante retardante. ....	56
7.2.6.2 Plastificante reductor de agua. ....	57
7.3 Diseño y elaboración de mezcla. ....	58
7.3.1 Diseño de mezcla método ACI. ....	58
7.3.2 Elaboración de mezclas y preparación de especímenes de concreto. ....	59
7.5.2.1 Equipos y herramientas. ....	60
7.5.2.2 Procedimiento de elaboración del concreto. ....	66
7.5.2.3 Realización de ensayos de resistencia a compresión. ....	74
8. Análisis de Resultados. ....	76
Conclusiones. ....	88
Referencias. ....	90
ANEXOS. ....	96
Caracterización de materiales. ....	96

Preparación de la mezcla y fabricación de especímenes .....	101
Realización de ensayos a compresión y resultados obtenidos.....	104
Registro fotográfico .....	105

**Lista de figuras**

Figura 1: Agregado grueso.....	24
Figura 2: Relación entre resistencia a la compresión y edad equivalente en hora controlar-la-temperatura-y-madurez-del-concreto-en-la-obra-1. ....	27
Figura 3. presentación cemento Ultracem tipo ART estructural.....	38
Figura 4. Arena fina de Santo Tomás.....	41
Figura 5. Arena gruesa de Andimineral S.A.S. ....	41
Figura 6. Curva granulométrica individual de las muestras de agregado fino.....	42
Figura 7 Curva granulométrica del promedio de las muestras agregado grueso .....	42
Figura 8. Grava Canto rodado TMN 3/4". ....	45
Figura 9. Curva granulométrica individual de las muestras agregado grueso (Fuente: Ultracem). ....	46
Figura 10. Curva granulométrica del promedio de las muestras agregado grueso fuente: Ultracem) ....	46
Figura 11. Aditivo EUCON WR 85 empleado.....	50
Figura 12. Aditivo PLASTOL 7200 ULTRA empleado.....	51
Figura 13. Máquina mezcladora. ....	53

Figura 14. Moldes cilíndricos de plástico empleados.....	53
Figura 15. Ilustración de pala empleada .....	54
Figura 16. Martillo de goma empleado .....	54
Figura 17. Varilla compactadora.....	55
Figura 18. Balanza.	
Figura 19. Cono de Abrams, para la medición del asentamiento del concreto es estado fresco.....	56
Figura 20. Recipiente y medidor de aire.....	56
Figura 21. Herramientas menores.....	57
Figura 22. Ilustración del pesaje de los materiales utilizados en la mezcla.....	57
Figura 23. Preparación del concreto en la mezcladora.....	58
Figura 24. Ilustración del procedimiento del ensayo de asentamiento.....	59
Figura 25. Ilustración del procedimiento del ensayo de contenido de aire.....	59
Figura 26. Aplicación de desmoldante a los cilindros plásticos empleados.....	60
Figura 27. Elaboración de especímenes de concreto.....	60
Figura 28. Ilustración proceso de desencofrado de los especímenes.....	61
Figura 29. Demarcación de la técnica.....	61
Figura 30. Muestras seleccionadas para la realización de los ensayos a compresión.....	64

Figura 31. Consola Automax pro.....	65
Figura 32. Bastidor para compresión de cilindros CT-1500.....	65
Figura 33. Resistencia a la compresión a los 7 días para cada muestra de cada técnica de curado. ....	66
Figura 34. Resistencia a la compresión a los 28 días para cada muestra de cada técnica de.....	67
Figura 35. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días para cada técnica. ....	67
Figura 36. Resistencia a la compresión a los 28 días para cada técnica vs sin curado a los 28 días.....	70
Figura 37. Aumento porcentual entre los 7 y 28 días de curado en cada técnica. ....	71
Figura 38. Ficha técnica del cemento Ultracem (Fuente: Ultracem) .....	82
Figura 39. Ficha técnica de la Ceniza (Fuente.....)	83
Figura 40. Características físicas agregado fino.....	83
Figura 41. Porcentaje equivalente de arena agregado fino.....	83
Figura 42. Porcentaje de partículas livianas agregado fino.....	84
Figura 43. Porcentaje de partículas deleznales agregado fino.....	84
Figura 44. Reactividad potencial agregado fino.....	84
Figura 45. Características físicas agregado grueso .....	85

Figura 46. Ensayo de desgaste agregado grueso .....	85
Figura 47. Porcentaje de partículas livianas agregado grueso.....	86
Figura 48. Porcentaje de partículas deleznales agregado grueso Contenido de cloruros y sulfatos de agregados finos y gruesos .....	86
Figura 50. Consola y bastidor para compresión utilizado para los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros.....	89
Figura 51. Cilindros fallados en el ensayo de resistencia a la compresión.....	89



**Lista de tablas**

Tabla 1. Tipo de cemento Portland según su uso .....	26
Tabla 2. Relación de los materiales componentes del concreto a emplear.....	37
Tabla 3. Características del cemento utilizado.....	38
Tabla 4. Resistencia a la compresión de cemento Ultracem tipo ART estructural (Fue Elaboración propia). .....	38
Tabla 5. Características físicas de la ceniza a emplear en el diseño de mezcla.....	39
Tabla 6. Características químicas de la ceniza .....	40
Tabla 7. Características físicas del agregado grueso.....	43
Tabla 8. Porcentaje equivalente de arena agregado fino.....	43
Tabla 9. Porcentaje de partículas livianas agregado fino.....	44
Tabla 10. Porcentaje de partículas deleznales agregado fino.....	45
Tabla 11. Contenido de cloruros y sulfatos agregado fino.....	45
Tabla 12. Características físicas del agregado grueso.....	47
Tabla 13. Datos y resultados del ensayo de desgaste por abrasión.....	47
Tabla 14. Porcentaje de partículas livianas agregado grueso.....	48
Tabla 15. Porcentaje de partículas deleznales agregado grueso.....	48

Tabla 16. Contenido de cloruros y sulfatos agregado grueso.....	49
Tabla 17. Diseño de mezcla de concreto bombeable de 3000psi .....	52
Tabla 18. Técnicas de curado realizadas en la investigación.....	62
Tabla 19. Desviación estándar, nomenclatura y descripción de cada técnica de curado.....	68
Tabla 20. Fallas características de las muestras posterior al ensayo de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.....	73

## Introducción

El concreto hidráulico es el material más utilizado en la industria de la construcción. Desde su descubrimiento, este material ha evolucionado con el objetivo de facilitar las construcciones civiles, su gran uso se debe a sus propiedades mecánicas y a su facilidad de producción y economía. Uno de los materiales más importantes del concreto hidráulico es el conglomerante, el cual en Roma aproximadamente 2 siglos a.d.c. estaba conformado por caliza calcinada que al ser mezclado con tobas volcánicas y piedras se formaba una piedra artificial utilizada para la construcción de estructuras que actualmente siguen en pie, como el Panteón o Iglesia de Santa María de los Mártires (Gutiérrez De López, 2003). A lo largo de la historia de la humanidad este material conglomerante ha evolucionado hasta ser conocido actualmente como el cemento Portland.

El cemento Portland es producido a través de la pulverización del Clinker, el cual proviene de la calcinación en un horno rotatorio de materiales calcáreos y argiláceos (Torres Serrano, 2012).

El concreto hidráulico está conformado principalmente por la mezcla de cemento Portland, agua y agregados. El agua tiene como función hidratar las partículas de cemento y agregados con el fin de homogenizar la mezcla y darle las propiedades de fraguado, mientras que los agregados finos y gruesos otorgan volumen a la mezcla e influyen en las propiedades fundamentales en el concreto como lo es la resistencia, consistencia, durabilidad, entre otras propiedades que cobran especial importancia para su adecuada y eficiente utilización (Gutiérrez De López, 2003).

Entre las propiedades que caracterizan al concreto hidráulico se encuentra la resistencia a la compresión, la cual le otorga al concreto la capacidad de resistir cargas a compresión, según (Lizarazo Marriaga & Gómes Cortés, 2007) la resistencia a la compresión es el parámetro principal para definir las características del concreto en estado endurecido, su valoración se puede realizar mediante la fabricación de cilindros en el momento de la mezcla. La resistencia a la compresión del concreto depende del tipo de cemento a utilizar, la relación agua/cemento y las propiedades de los agregados, la preparación de la mezcla, la temperatura y la metodología de curado que se emplee en el concreto endurecido (Lizarazo Marriaga & Gómes Cortés, 2007).

El curado es el proceso donde el concreto hidráulico es mantenido bajo las condiciones de humedad y temperatura necesaria, hasta que logra su madurez y alcanza las propiedades para las que fue diseñado. Según (Guevara, y otros, 2011) el curado ayuda a que durante los primeros 7 días se desarrolle aproximadamente el 70% de la resistencia de diseño y a los 14 días un 85 %. En la actualidad existen diferentes métodos de curado, los cuales son usados dependiendo del plan de obra, para evitar la deshidratación del concreto, siendo la humedad uno de los factores más importante para alcanzar su resistencia.

Realizar un análisis comparativo de las técnicas de curado para el concreto utilizadas comúnmente en el campo de la construcción y cómo impactan en la resistencia a la compresión del concreto hidráulico, nos permitirá en obra, hacer una mejor elección del método a utilizar para curar el concreto.

Para realizar este análisis se considera la norma técnica colombiana (NTC) y los métodos establecidos por la sociedad americana para pruebas y materiales

(ASTM) las cuales se emplean para la ejecución de los ensayos previos a la realización del diseño de mezclas, la elaboración de los cilindros de concreto hidráulico, el curado de los cilindros de concreto en condiciones estandarizadas y el ensayo de resistencia a la compresión.

En este trabajo de grado se ha elaborado un concreto hidráulico de 3000 psi para la fabricación de 48 muestras cilíndricas de concreto, posterior a la realización de las muestras se emplearán diversas técnicas de curado las cuales son: inmersión total en agua de grifo, inmersión total en agua con cal y control de temperatura, inmersión total en agua de mar, agentes de curado, recubrimiento con láminas de polietileno, rociado de agua manual y sin curado. Después de esto se realizarán ensayos de compresión a tres muestras a los 7 y 28 días con el fin de realizar un análisis comparativo entre las técnicas utilizadas en esta investigación.

### **Planteamiento del problema**

El curado es el proceso donde el concreto hidráulico es mantenido bajo las condiciones de humedad y temperatura necesaria, hasta que logra su madurez y un desarrollo adecuado de sus propiedades al máximo, Por lo que los investigadores desarrollaron un método para considerar las diferencias de temperatura entre las muestras elaboradas en laboratorio y el lugar de construcción. La primera norma que especificó el método de madurez del concreto hidráulico en obra fue la ASTM C 1074, expedida en 1987.

En la actualidad se puede conocer la resistencia a la compresión del concreto in situ y se pueden utilizar diferentes técnicas de curado teniendo en cuenta el ambiente en el que se construye, pero estas técnicas necesitan ser analizadas a profundidad debido a que cada técnica puede modificar las propiedades del concreto. Por lo tanto, se hace necesario un estudio que pueda identificar qué técnicas de curado son las más adecuadas y óptimas para ser implementadas en la obra civil.

¿Qué tan eficiente son las técnicas de curado usadas actualmente en el campo de la construcción?, en este trabajo de grado se estudiará la influencia de diferentes técnicas o métodos comúnmente utilizados en el sector de la construcción para el curado del concreto, con el fin de analizar el efecto que éstas tienen en los valores de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. Para ello, se realizará una evaluación y análisis comparativo de este parámetro a diferentes muestras de un mismo concreto, curado con los siguientes métodos: inmersión total en agua de grifo, inmersión total en agua con cal y control de temperatura, inmersión total en agua de mar, agentes de

curado, recubrimiento con láminas de polietileno, rociado de agua manual y sin curado.

### **Justificación**

En el campo de la construcción, el uso de diferentes metodologías de curado ha realizado cambios significativos en las características del concreto, viéndose afectada unas de sus propiedades más importantes como lo es la resistencia a la compresión.

El estudio de estas metodologías de curado permite realizar un análisis de su influencia en las propiedades del concreto hidráulico, lo que nos permite distinguir las técnicas de curado que realizan una mejor madurez del concreto, teniendo en cuenta las condiciones ambientales a las que se expone el concreto in situ y las exigencias actuales de la industria de la construcción como los presupuestos y cortos tiempos de construcción.

Cuando se identifican las mejores técnicas de curado del concreto, se puede realizar una elección que favorezca la calidad de la obra en todos sus aspectos, manteniendo el concreto en las condiciones óptimas de hidratación y temperatura, del mismo modo desarrollando de la mejor manera posible las propiedades del concreto, especialmente su resistencia a la compresión.

Por todo lo anterior resulta necesario realizar este tipo de estudios que permiten, a través de una comparación de las diferentes técnicas comúnmente empleadas para el proceso del curado de elementos de concreto en el ámbito local, identificar la(s) técnica(s) que más contribuyen a la obtención de los valores de resistencia a la compresión de diseño de los elementos estructurales construidos con concreto, que a su vez contribuyen al aseguramiento de la calidad de las obras civiles.

## **Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

- Analizar la influencia de las técnicas empleadas para el curado de elementos estructurales contruidos con concreto hidráulico en los valores de su resistencia a la compresión.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Revisar y construir el estado del arte que englobe la temática relacionada con las diferentes metodologías de curado y sus efectos en las propiedades del concreto.
- Realizar el diseño de mezcla del concreto a utilizar para la elaboración de los cilindros, con base en la caracterización previa de los materiales.
- Realizar el control de calidad del concreto fabricado, a través de la realización de ensayos en estado fresco y en estado endurecido.

## **Marco teórico-conceptual**

### **5.1.1 Concreto hidráulico.**

El concreto hidráulico según (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto, 2003). es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla de pasta y agregados minerales. La pasta



se compone de cemento y agua, que al endurecerse une a los agregados formando una roca artificial.

El concreto hidráulico es un material muy importante en el campo de la construcción, gracias a su gran aplicabilidad y propiedades, este material está conformado por una mezcla entre un material aglutinante (cemento), un material de relleno (agregados) y agua, dado a que esta mezcla se trabaja en forma líquida, al endurecerse se forma una piedra artificial llamada concreto, la cual desarrolla una gran resistencia a la compresión a los 28 días de su endurecimiento. (Torres, 2012)

#### **5.1.1.1 Aditivos.**

Los concretos hidráulicos también pueden contar con aditivos, lo cuales según la ASTM C125 son materiales diferentes al agua, agregados y cemento hidráulico, que se utiliza como componente del concreto o mortero y que se agrega a la mezcla antes o durante el mezclado

(ASTM International, ASTM C125-20 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, 2020). Estos se agregan a la mezcla de concreto con el fin de cambiar alguna de sus características, dependiendo de las exigencias de construcción a las que será sometido.

#### **5.1.1.2 Agregados.**

Los agregados conforman entre el 70% y 85 % de la masa del concreto, y constituyen la mayor parte del volumen de éste (Torres Serrano, 2012). Los agregados finos son las arenas y tienen un tamaño máximo de partícula de 5mm, mientras que

los agregados gruesos son las gravas o piedra triturada y sus partículas tienen un tamaño mayor a 5mm, pudiendo alcanzar hasta los 38 mm de diámetro nominal.

En un comienzo se creía que los agregados eran usados por motivos económicos, ya que estos corresponden a un alto porcentaje del contenido del concreto, pero en la actualidad se ha demostrado que la calidad de los agregados mejora las propiedades del concreto, como su resistencia, trabajabilidad, consistencia, acabado final, durabilidad, propiedades térmicas y elásticas, entre otros factores que componen un buen concreto hidráulico (Torres Serrano, 2012).

La calidad de los agregados depende de su densidad, dureza, forma, porosidad, tamaño y que no tenga reacciones químicas con el álcali del cemento (Torres Serrano, 2012). También es importante su limpieza y granulometría, ya que esto afecta la adherencia y permite la distribución de los agregados de forma homogénea dentro del concreto hidráulico.



Figura 1. Agregado grueso.

### **5.1.1.3 Agua.**

En el concreto hidráulico, el agua tiene la función de hidratar las partículas de cemento y de agregados, con el fin de producir la reacción ligante en el concreto hidráulico, para que se homogenice y fragüe, como también brindarle manejabilidad y consistencia al concreto (Torres Serrano, 2012).

Según (Torres Serrano, 2012) El agua hace parte de aproximadamente el 15% del volumen del concreto, donde aproximadamente el 10% se evapora durante el proceso de fraguado. Por lo tanto, el agua al mantener hidratado al concreto hidráulico, tiene un papel importante en el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto durante la madurez de éste.

### **5.1.1.4 Cemento Portland.**

El cemento Portland es un material que al ser mezclado con agua tiene la capacidad de fraguar y endurecer, según (Gutiérrez De López, 2003) el cemento portland se compone por cal, sílice, alúmina, óxido de hierro y yeso hidratado, el yeso se adiciona al Clinker durante la molienda con el fin de retardar el tiempo de fraguado de la pasta de cemento. Según la norma (ASTM International, ASTM C150M-09 Especificación Normalizada para Cemento Portland, 2009), los cementos Portland se dividen en ocho tipos dependiendo de su uso como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Tipo de cemento Portland según su uso (Fuente: (ASTM International, ASTM C150M-09 Especificación Normalizada para Cemento Portland, 2009)).

<b>Cemento Portland</b>	<b>Uso principal</b>
Tipo I	Para uso general cuando no se requieren propiedades especiales.
Tipo IA	Para los mismos usos que el tipo I, donde se desea incorporación de aire.
	Para uso general más la necesidad de resistencia moderada a sulfatos alor de hidratación moderado.
Tipo II	
Tipo IIA	Para los mismos usos que el tipo II, donde se desea incorporación de aire.
Tipo III	Para usar cuando se desea alta resistencia inicial.

Tipo IIIA	Para los mismos usos que el tipo III, donde se desea incorporación de aire.
Tipo IV	Para usar cuando se desea bajo calor de hidratación.
Tipo V	Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

---

### **5.1.2 Curado del concreto.**

El curado es el proceso donde el concreto hidráulico es mantenido bajo las condiciones de humedad y temperatura necesaria, hasta que logra su madurez y alcanza la resistencia para la que fue diseñado, además de otros factores que influyen en el concreto, como la porosidad y la resistencia a la abrasión.

El curado del concreto está definido por (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo, 2005) como el proceso natural del concreto después del fraguado por el cual madura y desarrolla sus propiedades mecánicas.

Actualmente en el campo de la construcción se utilizan diferentes métodos de curado, pero todos tienen el mismo objetivo, que es ayudar al concreto a desarrollar sus propiedades mecánicas en especial su resistencia a la compresión durante su etapa de madurez, la cual corresponde a los 28 días posteriores a su fraguado.

### 5.1.3 Madurez del concreto.

La madurez del concreto es la relación entre el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto, la temperatura y la edad de este, las propiedades del concreto evolucionan a medida que el cementante reacciona, se hidrata y libera calor, cambiando significativamente en las primeras horas del fraguado” (Berrío, 2020).

Durante la madurez del concreto existen muchos factores que influyen en el desarrollo de las propiedades de éste, como lo son las propiedades de los materiales utilizados en la mezcla, el lugar de construcción, la temperatura y humedad del concreto, exposición a la intemperie y la temperatura inicial de los materiales (Berrío, 2020).

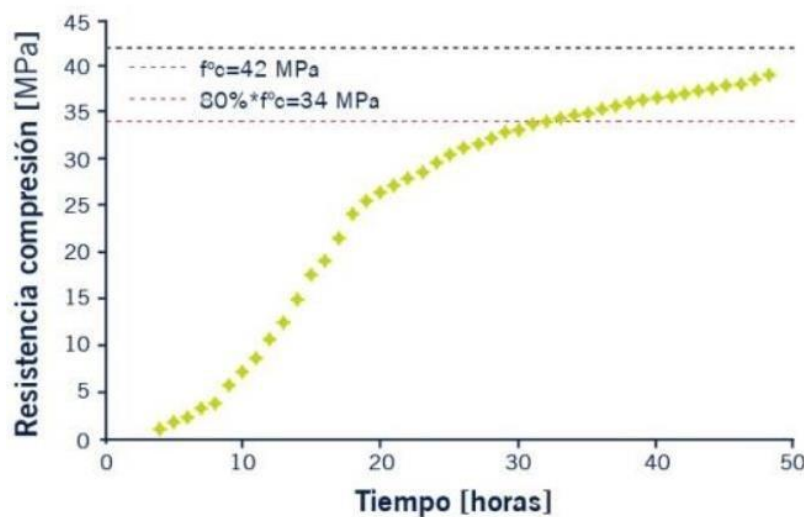


Figura 2. Relación entre resistencia a la compresión y edad equivalente en horas (fuente: Berrío,2020). tomado de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/por-que-es-importante-controlar-la-temperatura-y-madurez-del-concreto-en-la-obra-1>.

#### **5.1.4 Resistencia a la compresión del concreto.**

La resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes del concreto hidráulico y esta se define en estado endurecido como la capacidad del concreto de soportar una máxima carga a compresión. En Colombia, la NTC 2275 muestra los métodos recomendados para determinar la resistencia a la compresión del concreto. Esta capacidad se puede validar mediante la fabricación de cilindros o mediante la extracción de núcleos cilíndricos del concreto endurecido con el fin de ser sometidos a la prueba de compresión (Lizarazo Marriaga & Gómez Cortés, 2007).

El desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto afirma que la resistencia a compresión depende de la geometría del espécimen, preparación de la muestra, contenido de humedad, temperatura, refrentado y velocidad de carga (Lizarazo Marriaga & Gómez Cortés, 2007). De esto se puede afirmar que la resistencia a la compresión del concreto es afectada por la relación agua cemento, ya que la experiencia ha demostrado que, a una mayor cantidad de agua en la mezcla la resistencia del concreto se ve reducida.

#### **Estado del arte**

Según (A.L.G, C, & .Saciloto, 2010) quienes realizaron un estudio enfocado al tiempo y al comportamiento de la penetración de ciertos cloruros del hormigón, llevando a cabo esta investigación con diversas concentraciones de la ceniza de cáscara de arroz (10%, 20% y 30%) y comparadas con dos mezclas binarias y con

cemento Portland 100%, encontraron que las mezclas con tiempos de curado más largos, alcanzaron valores de resistencia a la compresión más altos (28 a 91 días). Adicionalmente, que al aumentar el contenido de la ceniza de cáscara de arroz generaba un concreto con mayor resistencia a la penetración de cloruros. Pero con respecto al tiempo de curado, las mezclas de cemento Portland y las de adiciones fueron influenciadas por los curados húmedos largos. A su vez, la resistencia mecánica y la resistencia a la penetración de cloruro dependían del tipo de adición, proporción y tiempo de curado usado, todo apuntando que un tiempo de curado óptimo para cada muestra permitían un mejor desarrollo de las propiedades, cumpliendo así con los criterios que están ligados a la durabilidad y resistencia, un curado no adecuado afectaría sus valores y sus propiedades.

En la investigación de (Selcuk & Volkan, 2005) se realizó un estudio con el objetivo para determinar las propiedades y el efecto de este método de curado a vapor y su influencia en la resistencia y madurez de concreto que lo componen cementos compuestos que son utilizados en el medio oriente que al parecer son ventajosos, estos investigadores realizaron muestras de hormigón en figuras de cubos para ser sometidas a un curado de vapor en diferentes días (4,8,16,24 y 36) bajo temperaturas de 65° y 85°C. Después del estudio observaron una variación de los valores de resistencia y la madurez de mismo y llegaron a las conclusiones en donde dicha necesidad sea una alta resistencia temprana con propósitos de desmolde lo más adecuado es utilizar temperatura de 85° para los concreto. para un curado a vapor a presión atmosférica en la producción de hormigón prefabricado en caso de que no haya demanda de alta resistencia temprana.



En un estudio experimental se evaluaron los efectos que tienen diversas técnicas de curado y su efecto en la resistencia, en este se utilizó ceniza de aceite de palma en lugar de cemento, el cual fue remplazado parcialmente con porcentajes de ceniza de 0%, 10% y 15%. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión aumenta directamente proporcional al contenido de la ceniza y que el curado por inmersión en agua tiene el mayor impacto en las resistencias del hormigón. (Stephen & Jeffrey, 2020).

Por otro lado, (linSalman, Khan, Muhammad, Salman, & Muhammad, 2014) en su trabajo de investigación tenían como objetivo estudiar el método de control de deformación autógena siendo esta una propiedad básica del hormigón de altas prestaciones siendo la cantidad de cemento la principal razón de la contracción autógena. Estos investigadores estudiaron el método de sustitución de la bentonita por cemento. La bentonita remplaza al cemento en proporciones de 5%, 10%, 15% y 10% y se analiza la deformación por retracción que estas podrían tener concluyendo que el incorporar esta bentonita genero una mayor estabilidad térmica y los costos de las técnicas de curado disminuirían debido a esta estabilidad, además se puede incorporar al concreto expuesto al calor y fuego.

En otra investigación, se estudian los efectos de los métodos post-curado con llama y aire sobre la adhesión, resistencia a la compresión y modulo elástico con muestras de concreto bajo diferentes tiempos de curado, estas fueron expuestas al fuego a una temperatura de 600°C y luego la enfriaron a temperatura ambiente en el aire, esto lo realizaron a los 7, 30 y 60 días después del post-curado para comprender el impacto de los métodos de post-curado, luego así concluyendo que el curado al aire

muestra una recuperación significativa de la resistencia y que esta depende del tiempo de curado (Azhar, HamadAnis, & Mohamad, 2021).

Por otra parte, (Joseph P, y otros, 2020) estudiaron la influencia del clima cálido en las propiedades de enfriamiento y dureza del concreto autopolimerizable (SC) y el concreto convencional ordinario (NC) en climas cálidos. Ellos utilizaron un agente de autocurado de polímero soluble en agua polietilenglicol (PEG 400) que agregaron a la mezcla SC. Tuvieron en cuenta la temperatura del hormigón seco y del agua al momento de mezclar, curaron muestras en agua y en aire y analizaron las propiedades de trabajabilidad, resistencia a la compresión, resistencia a la rotura por tracción y resistencia a la flexión. Después de esto concluyeron que el aditivo PEG 400 superó todas las dificultades de producir hormigón en climas cálidos. Por tanto, se recomienda su uso en hormigón en estas condiciones, debido a que las propiedades mecánicas de las muestras sin este aditivo eran inferiores.

(Amry, Dahlia, Hidenori, Yasutaka, & Daisuke, 2020) evaluaron la aplicabilidad del agua de mar como agente de mezcla y curado en muestras de mortero de cemento de cuatro años enfocándose en evaluar el desempeño a largo plazo de muestras de mortero reforzado expuestas al agua de mar. Las muestras que utilizaron incluían cemento Portland ordinario (OPC), escoria de alto horno (GGBFS) y hormigón armado liso recubierto con epoxi o acero inoxidable, además estas muestras transitaban por ciclos húmedos y secos simulando áreas de mareas y salpicaduras en el laboratorio, evaluaron la corrosión utilizando técnicas electroquímicas y como resultado muestran que, como agente de curado, el agua de mar tiene un impacto significativamente mayor en la actividad de corrosión que como agente mixto.

(HongJae, Sun-Jong, Park, & Yubin, 2019) realizaron un estudio de los cambios fisicoquímicos y mecánicos de pastas de cemento y concreto dañados térmicamente para condiciones de curado. En este estudio llevaron a cabo ensayos a diversas muestras de concreto que tuvieron exposiciones a alta temperatura y humedad relativa para luego realizar ensayos destructivos y no destructivo, tales como medición de resistencia a tracción, modulo elástico dinámico y otros parámetros, para evaluar el grado de daño térmico y su recuperación.

Ahmed y sus compañeros de investigación (Ahmed, Serwan, Parveen, Rawaz, & Wael, 2021) realizaron un estudio que consistió en establecer un modelo sistemático en donde se puede predecir la resistencia a la compresión del concreto, basándose en mezclas de diversas cantidades de ceniza volante y modelos estadísticos de diferentes estudios ya previamente ensayados, para eso implementaron la calificación de métodos de regresión lineal y no lineal, redes, modelos de árbol y más en donde recolectaban datos de los parámetros más pertinentes como la ceniza y agua sin dejar atrás el contenido de cemento, grava arena y el tiempo de curado.

Los autores (In, Abdul, & Hong, 2021) realizaron un estudio con el objetivo de analizar el efecto del curado por carbonatación sobre la hidratación y microestructura del hormigón de fosfato de magnesio. Realizaron muestras de hormigón y curadas en el ambiente como en ambiente de curado de carbonatación. Probaron su rendimiento con el ensayo de resistencia a la compresión y nano indentacion, además de ser estudiadas mediante microscopio electrónico, rayos x de dispersión de energía, y otro más y con base a estos estudios mostraron que en comparación a las muestras en

hormigón sin carbonizar, el carbonizado solidificado representa una mejora en las propiedades mecánicas.

Según Cheng-ming y sus compañeros (Heng-lin, Cheng-ming, Lei, Ying, & Chun-hua, 2009) estudiaron el entorno operativo y la confiabilidad de las estructuras de hormigón de diferentes fábricas, llevando a cabo un análisis cuantitativo y cualitativo del entorno de la estructura, estudiaron los gases corrosivos, líquidos y sólidos del entorno mecánico y los mecanismos de deterioro de la estructura y la técnica de curado de la misma.

Los autores (Seonhyeok, Namkon, H.K, & Solmo, 2021) estudiaron la hidratación hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) curándolo en diversas condiciones de curado para si observar y efecto y reacción, además trataron muestras bajo tratamiento térmico y observaron las reacciones de la sílice amorfa, y cemento que estas reflejaron como resultado de la investigación que dependían de las condiciones de curado que fueron sometidas y conducían a un tratamiento térmico de UHPC.

(Emriye, Tayfun, Barış, & İlkerBekir, 2020) realizaron un estudio, en el cual implementaron el negro de carbón en el hormigón para la conductividad y curado eléctrico. Esto lo hicieron con diversos porcentajes de negro de carbón y diferentes valores de voltaje para el curado eléctrico que fue realizado sobre el hormigón fresco durante 24 horas posteriormente de desmoldaron y aplicaron el curado estándar en la piscina. Como fin del estudio encontraron que la implementación de negro de carbón y curado eléctrico acelero el fraguado y el tiempo de moldeo se acortó además del incremento de la resistencia en un 30% los primeros días.

Un estudio realizado sobre el aditivo (YREC) siendo este repelente al agua, con base a este aditivo empezaron a investigar las características de contracción, resistencia y agrietamiento del concreto y concluyeron que la implementación de este aditivo mejoró el desempeño del concreto siempre y cuando sea curado en seco, ya que retiene la humedad, mejora la porosidad de la estructura y permite alcanzar mayor resistencia (He, y otros, 2020).

Una investigación donde se estudió el proceso de curado al vapor, la evolución de las propiedades mecánicas y la permeabilidad del hormigón, en donde midieron los procesos de hidratación y rendimiento en el transcurso del curado, así mismo estableciendo el modelo de evolución de la permeabilidad. En este estudio concluyeron que la hidratación en la primera fase fue menor y la porosidad mayor, pero con el aumento de temperatura del curado y la edad de este, las propiedades mecánicas mejoran y la permeabilidad se reduce (Jinyan, y otros, 2020).

### **Diseño metodológico**

Este proyecto de investigación se desarrolló a través de 6 fases, las cuales se resumen a continuación:

#### **Fase 1: Revisión bibliográfica**

En esta fase se inició con la búsqueda de información de la temática relacionada con las diferentes metodologías de curado usadas en la industria de la construcción, así como también sus consecuencias en las propiedades del concreto. La búsqueda se realizó a través de artículos científicos, trabajos de grado similares, libros, bases de datos especializadas, etcétera.

#### **Fase 2: Aplicación de ensayos de caracterización de los materiales**

En esta fase se realizaron todos los ensayos de caracterización previa, correspondientes a cada material que conforma el diseño de mezclas del concreto hidráulico utilizado en esta investigación. Estos ensayos se realizaron con base en la normativa vigente y sus resultados son las directrices para la siguiente fase.

#### **Fase 3: Diseño de mezcla y selección de técnicas de curado**

Como fase 3, se procedió a la elaboración del diseño de mezcla utilizado para la investigación, teniendo en cuenta la caracterización previa de los materiales y la normativa vigente. Así mismo se realizó la selección de las técnicas de curado de concreto que son aplicadas a las muestras fabricadas, con base a lo encontrado en la literatura y analizado en el sector del mercado local.

#### **Fase 4: Fabricación y curado de mezclas**

En esta fase se fabricaron las respectivas muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. Se fabricaron 6 muestras cilíndricas de concreto por cada técnica de curado seleccionada en la fase anterior (asumiendo un trío para ensayar a los 7 días y el otro a los 28 días). A dichos ejemplares se les aplicaron las técnicas de curado anteriormente seleccionadas. La fabricación de las muestras y la realización de las técnicas de curado siguen las condiciones propuestas por la norma técnica colombiana.

#### **Fase 5: Ensayos de laboratorio**

Posterior a los 7 y 28 días de iniciar el proceso de curado a todos los cilindros de muestras, se realizaron los respectivos ensayos de resistencia a la compresión a cada trío de muestra por técnica. Esto con el fin de analizar los resultados posteriormente.

#### **Fase 6: Análisis de resultados**

Finalmente se revisaron y compararon los resultados obtenidos, con el fin de analizar el efecto que tienen las diferentes técnicas de curado escogidas y aplicadas en las muestras fabricadas, sobre los valores de resistencia a la compresión del concreto. Así mismo se desarrollaron las conclusiones obtenidas de la presente investigación.

## Desarrollo experimental

### 7.1 Selección de materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de los cilindros de concreto fueron donados por la empresa Ultracem, los cuales estaban ya caracterizados debido a la misma actividad de la empresa. En los anexos del presente trabajo se adjuntan los informes de caracterización de los materiales.

Para la elaboración de las muestras cilíndricas se eligió diseñar un concreto bombeable de 3000 psi tipo ART (alta resistencia temprana), con el fin de simular un concreto de uso común sin mayor exigencia. La siguiente tabla presenta la relación de los materiales empleados para la elaboración de este concreto.

*Tabla 2.*

*Relación de los materiales componentes del concreto a emplear (Fuente: Elaboración propia).*

<b>Materiales</b>	<b>Procedencia</b>	<b>Aplicación</b>
Cemento de uso general	Ultracem	Cementante 1
Ceniza	Gecelca S.A. E.S.P.	Cementante 2
Arena gruesa	Andiminerals S.A.S.	Agregado fino 1
Arena fina	Santo Tomás	Agregado fino 2
Grava ¾"	Ingecost	Agregado grueso
Agua potable	AAA	Hidratante
Aditivo 1	Toxement	Retardante
Aditivo 2	Toxement	Reductor de agua



Nota: Procedencia y uso de los materiales a utilizar para la elaboración del concreto de 3000 psi.

## 7.2 Caracterización de los materiales

### 7.2.1 Cemento Portland.

En esta investigación fue utilizado un cemento tipo ART (alta resistencia temprana), por lo que se espera que este desarrolle su resistencia de diseño antes de los 28 días posteriores al fraguado. El cemento, al igual que todos los demás ingredientes, fue suministrado por la empresa Ultracem y cumple con los estándares de la norma NTC 121. De acuerdo con la ficha técnica del producto, este cemento posee las características presentadas en la siguiente tabla.

*Tabla 3.*

*Características del cemento utilizado (Fuente: Ficha técnica de cemento Ultracem tipo ART*

<b>Parámetro de control</b>	<b><u>Método de ensayo</u></b>	<b><u>Especificación NTC 121</u></b>
Contenido de aire en volumen	NTC 224	Max 12%
Finura (permeabilidad de aire)	NTC 33	-
Finura en tamiz N° 325	NTC 294	-
Expansión en autoclave	NTC 107	Max 0.8%
Expansión barra de mortero, 14 días	NTC 4927	Max 0.02%

---

*estructural).*

---

Tabla 4.

*Resistencia a la compresión de cemento Ultracem tipo ART estructural (Fuente: Elaboración propia).*

<b><u>Resistencia a la compresión</u></b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Especificaciones</b>
1 día	NTC 220	1740 psi
3 días	NTC 220	3480 psi

Nota: Resistencia para cilindros de mortero realizados por la mezcla estandarizada por la norma NTC 220.

Este tipo de cemento es comercializado en presentaciones de 42.5 kg como se muestra en la Figura 3.



*Figura 3. presentación cemento Ultracem tipo ART estructural (Fuente: Ultracem).*

### 7.2.2 Ceniza.

La ceniza es utilizada como cementante suplementario contribuyendo a la reducción del uso del cemento, el cual en su proceso de fabricación genera grandes cantidades de dióxido de carbono. En el artículo periodístico de BBC la enorme fuente de emisiones de CO<sub>2</sub> (Rodgers, 2018) afirma que la producción mundial de cemento en el 2016 liberó aproximadamente 2.200 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, siendo el 8% de las emisiones totales generadas a nivel mundial. La ceniza no solo trae beneficios ambientales al reducir las cantidades de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera, esta también mejora las propiedades del concreto disminuyendo la porosidad y aumentando la durabilidad del concreto (Canul, Moreno, & Mendoza, 2016). La ceniza utilizada en el concreto hidráulico de esta investigación proviene de Monte Líbano a través de la empresa Gecelca S.A. E.S.P.

#### 7.2.2.1 Características físicas de la ceniza.

Previo a la inclusión de la ceniza en el concreto, a esta se le realizó una serie de ensayos para determinar la factibilidad de su uso en la mezcla. Los métodos utilizados para la realización de los ensayos de caracterización física de esta ceniza estuvieron basados por la ASTM. A continuación, se presentan los resultados.

*Tabla 5.*

*Características físicas de la ceniza a emplear en el diseño de mezcla (Fuente: Elaboración propia).*

Ensayo físico	Método de ensayo	Resultado
Finura en tamiz N° 325	ASTM C430	24%

Densidad

ASTM C188

2.5 g/ml

**7.2.2.2 Características química de la ceniza.**

Basados en la ASTM, se realizaron los ensayos para realizar el análisis químico de la ceniza a utilizar, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6.

Características químicas de la ceniza (Fuente: Ultracem).

Ensayo físico	Método de ensayo	Resultado (%)
Óxido de Sílice	ASTM C114	44.5
Óxido de Aluminio	ASTM C114	19.3
Óxido de Hierro	ASTM C114	14.5
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		78.2
Óxido de Calcio	ASTM C114	6.7
Óxido de Magnesio	ASTM C114	3.1
Óxido de Azufre	ASTM C114	3.2
Óxido de Sodio	ASTM C114	1.1
Óxido de Potasio	ASTM C114	1.3
Álcalis equivalentes	ASTM C114	2.0
Perdidas al fuego	ASTM C114	4.6
Humedad	ASTM C311	1.0

### 7.2.3 Agregado fino.

El agregado fino que conformaría la mezcla de concreto está integrado por arena fina utilizada comúnmente en la Costa Caribe, proveniente del municipio de Santo Tomás y arena gruesa proveniente de la empresa Andimineral S.A.S. Estos dos agregados fueron combinados y procedidos a la realización de los ensayos estipulados por la normativa colombiana. En este caso este agregado cumple con las especificaciones de los agregados para concreto, estipulada por la norma técnica colombiana NTC 174.



*Figura 4. Arena fina de Santo Tomás.*



*Figura 5. Arena gruesa de Andimineral S.A.S.*

#### **7.2.3.1 Características físicas del agregado fino.**

Al agregado se le realizó el ensayo de granulometría a dos muestras diferentes. Posterior a esto se graficó la curva granulométrica de las dos muestras y también se graficó el promedio de estas, encontrando que en ambas gráficas se cumple con la gradación máxima y mínima estipulada por la NTC 174.



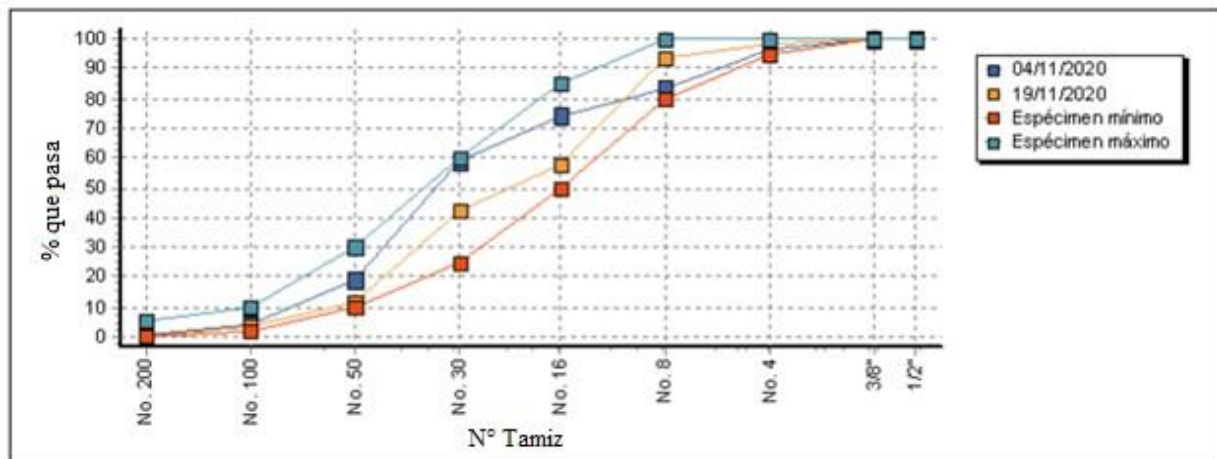


Figura 6. Curva granulométrica individual de las muestras de agregado fino (Fuente: Ultracem).

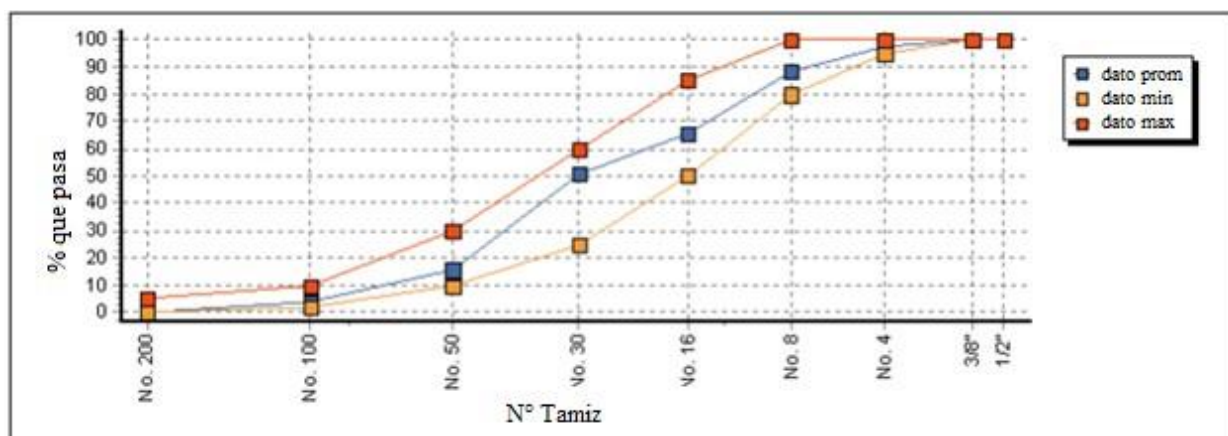


Figura 7. Curva granulométrica del promedio de las muestras agregado grueso (Fuente: Ultracem).

Además de esto, a los agregados se les fueron realizados los ensayos que son presentados a continuación, junto con sus resultados.

Tabla 7. Características físicas del agregado grueso (Fuente: Ultracem).

Ensayo	Resultados
Densidad suelta	1528.5 kg/m <sup>3</sup>

Absorción	1 %
Módulo de finura	2.8 %
Lavado sobre tamiz 200	2.1 %
Densidad aparente	2616.5 kg/m <sup>3</sup>

---

#### 7.2.3.2 Porcentaje equivalente de arena agregado fino.

El ensayo para determinar el porcentaje de arena que contiene el agregado fino fue realizado en base a la norma INV E-133-13, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 8.

*Porcentaje equivalente de arena agregado fino (Fuente: Ultracem).*

Lecturas	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Lectura arena	103	115	120
Lectura arcilla	152	169	173
Porcentaje de arena	68	68	69
Porcentaje de arena promedio		68	

---

#### 7.2.3.3 Porcentaje de partículas livianas agregado fino.

El ensayo para determinar el porcentaje de partículas livianas en el agregado fino fue guiado por el método INV E-220-13. Para este ensayo se utilizó cloruro de zinc en agua, el cual tiene una densidad de 2 g/cm<sup>3</sup>.



Tabla 9.

*Porcentaje de partículas livianas agregado fino (Fuente: Ultracem).*

<b>Resultados método INV E-220-13</b>			
Masa total de la muestra (g)	Masa de partículas que flotan (g)	Masa de muestra seca (g)	% de partículas livianas
362.4	0	359.2	0

#### **7.2.3.4 Porcentaje de partículas deleznales agregado fino.**

Utilizando el método INV E-211-13, se determinó el porcentaje de terrones de arcillas y partículas deleznales del agregado fino a utilizar para el concreto.

Tabla 10.

*Porcentaje de partículas deleznales agregado fino (Fuente: Ultracem).*

<b>Resultados método INV E-211-13</b>				
Tamaño tamiz	Masa de la muestra de ensayo (g)	Masa de la fracción después tamiz del ensayo(g)	Masa que pasa el (g)	Porcentaje de arcilla y partículas deleznales
Mayor a 1.18 mm	172	169.6	2.4	1.4

### 7.2.3.5 Contenido de cloruros y sulfatos agregado fino.

Por medio de la empresa Analquímicos se realizó el análisis de contenido de cloruros y sulfatos de la combinación de arenas de procedencia Santo Tomás y Andimineral, para determinar la reactividad que puede tener el agregado con los componentes de concreto como el cemento. Este análisis se realizó según las normas “Determinación del contenido de azufre en los agregados pétreos, INV E -233-13” (INVIAS, 2013) y “Método de ensayo para determinar cloruros solubles en agua, en mortero y concreto (NTC, 1999). Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 11.*

Contenido de cloruros y sulfatos agregado fino (Fuente: Ultracem).

<b>Muestra</b>	<b>Sulfatos SO<sub>4</sub></b>	<b>Cloruros Cl</b>
Mezcla arena Santo Tomas y ANDIMINERALS	0.088%	0.0002%

### 7.2.4 Agregado grueso.

Para la mezcla de concreto se utilizó como agregado grueso una grava canto rodado de TMN de ¾”, proporcionada por la empresa Ingecost. Esta grava de color oscuro se caracteriza por tener una buena gradación y dureza.



Figura 8. Grava Canto rodado TMN 3/4\".

#### 7.2.4.1 Características físicas agregado grueso.

Al agregado grueso se le realizó el ensayo de granulometría a dos muestras diferentes. Posterior a esto, se graficó la curva granulométrica de las dos muestras y también se graficó el promedio de estas, en ambas graficas se cumple con la gradación máxima y mínima estipulada por la NTC 174.

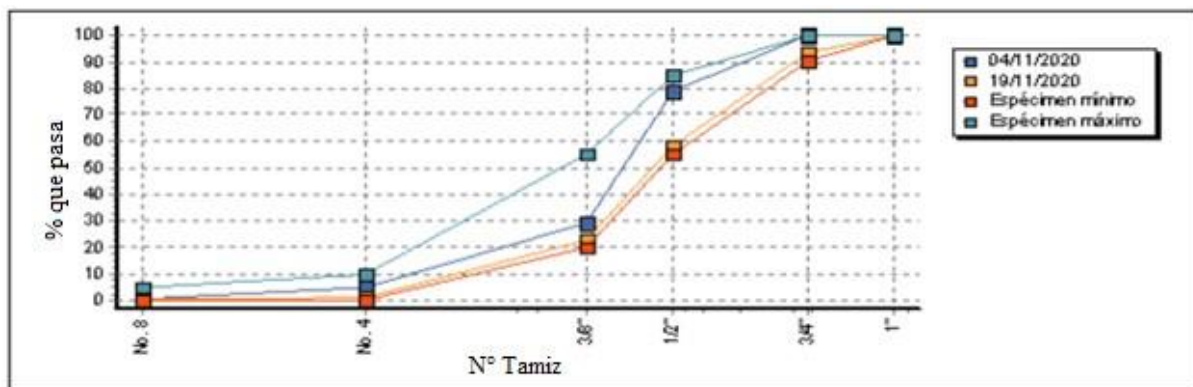


Figura 9. Curva granulométrica individual de las muestras agregado grueso (Fuente: Ultracem).

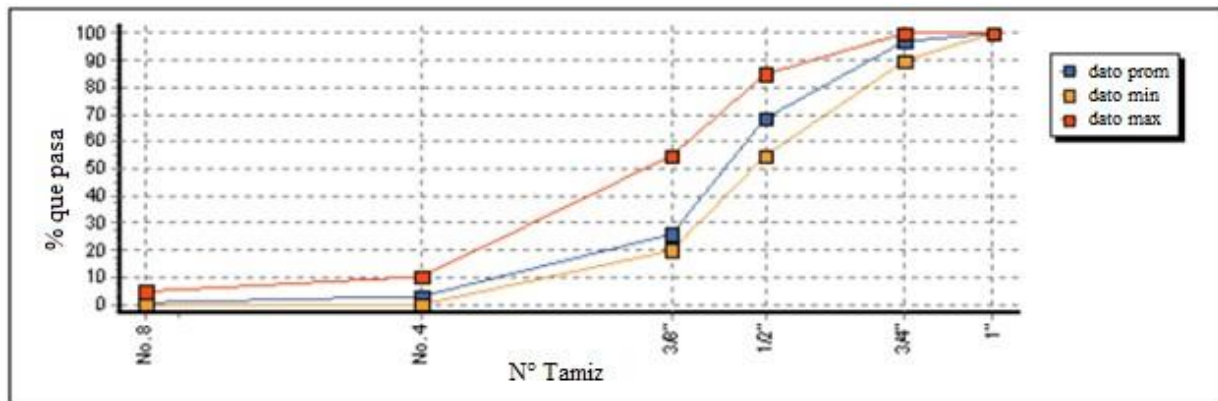


Figura 10. Curva granulométrica del promedio de las muestras agregado grueso (Fuente: Ultracem).

Al agregado grueso también se le realizaron los siguientes ensayos con base en la NTC

174.

Tabla 12.

Características físicas del agregado grueso (Fuente: Ultracem).

Ensayo	Resultados
Densidad suelta	1424 kg/m <sup>3</sup>
Absorción	1.6 %
Módulo de finura	6.7
Lavado sobre tamiz 200	1 %

Densidad aparente

2539 kg/m<sup>3</sup>**7.2.4.2 Porcentaje de desgaste a la abrasión agregado grueso.**

El agregado grueso debe ser sometido al ensayo de desgaste por abrasión en la máquina de los ángeles para así determinar su dureza, este ensayo está basado en la norma técnica colombiana NTC 98. A continuación, se muestran los datos con los que fue realizado este ensayo.

*Tabla 13.**Datos y resultados del ensayo de desgaste por abrasión (Fuente: Ultracem).*

<b>Datos del ensayo</b>	
Norma de referencia	NTC 98
Gradación usada	8
No. De esferas	11
No. De revoluciones	500
Masa muestra seca antes del ensayo (g)	5000
Masa muestra seca después del ensayo y lavada sobre el tamiz 1.7 mm (g)	3856
Masa perdida (g)	1144
% de desgaste	22.90%
Especificación menor de	40%

Nota: En la tabla se muestran los datos para la realización del ensayo de resistencia al desgaste realizado al agregado grueso canto rodado. También se muestran los resultados obteniendo como porcentaje de desgaste un 22.9% cumpliendo con la norma de referencia (NTC 98).

#### 7.2.4.3 Porcentaje de partículas livianas agregado grueso.

Para determinar el porcentaje de partículas livianas en la grava canto rodado, se empleó el método INV E-220-13. Para la realización de este ensayo, igualmente se utilizó cloruro de zinc en agua, el cual tiene una densidad de 2 g/cm<sup>3</sup>.

*Tabla 14.*

Porcentaje de partículas livianas agregado grueso (Fuente: Ultracem).

<b>Resultados método INV E-220-13</b>			
Masa total de la muestra (g)	Masa de partículas que seca flotan (g)	Masa de muestra (g)	% de partículas livianas
4637.8	0	4635.9	0

#### 7.2.3.4 Porcentaje de partículas deleznales agregado grueso.

De igual forma se tomó como guía el método INV E-211-13 para determinar el porcentaje de terrones de arcillas y partículas deleznales del agregado grueso a utilizar para el concreto. A continuación, se relacionan los resultados de este ensayo.

*Tabla 15.*

Porcentaje de partículas deleznales agregado grueso (Fuente: Ultracem).

---

**Resultados ensayo INV E-211-13**


---

Gradación		Masa		% de		% de terrones de arcilla y p. deleznales
de la muestra	Masa de la fracción antes de ensayo (g)	Masa de la fracción después de ensayo (g)	que pasa por tamiz (g)	% de terrones de arcilla y p. deleznales	% de terrones de arcilla y p. deleznales	
Tamiz (mm)	(%ret)					ponderado
9.5	23.6	1385.2	1384.7	0.5	0	0.01
19	71.6	4197.8	4196.7	1.1	0	0.02
Porcentaje total de terrones de arcilla y partículas deleznales						0.015

---

**7.2.4.5 Contenido de cloruros y sulfatos agregado grueso.**

Por medio de la empresa Analquímicos se realizó el análisis de contenido de cloruros y sulfatos del agregado grueso, este análisis se realizó según la norma (INVIAS, INV E-233-13

Determinación del contenido de azufre en los agregados pétreos, 2011) y la (NTC, NTC 4049 Método de ensayo para determinar cloruros solubles en agua en mortero y concreto, 1999). Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 16.*

*Contenido de cloruros y sulfatos agregado grueso (Fuente: Ultracem).*

---

Muestra	Sulfatos SO <sub>4</sub>	Cloruros Cl
---------	--------------------------	-------------

---

---

Canto rodado INGECOST	0.712%	0.00177%
-----------------------	--------	----------

---

### **7.2.5 Agua.**

El agua en el concreto hidráulico cumple la función de hidratar el cemento para otorgar las propiedades de fraguado y endurecimiento; por lo tanto, se debe utilizar agua limpia que esté libre de componentes que puedan afectar la calidad del cemento como grasas, mugre o agentes químicos. Para la elaboración del concreto a utilizar en esta investigación se empleó agua de grifo proveniente del sistema de acueducto de servicio público de la empresa AAA.

### **7.2.6 Aditivos.**

Teniendo en cuenta que se utilizó un concreto bombeable de 3000 psi y la cantidad de cilindros a fundir era de 48 muestras, se empleó la inclusión de aditivos a la mezcla con el fin de mejorar el tiempo de trabajabilidad del concreto sin afectar sus propiedades. Estos aditivos permiten que el concreto tarde más tiempo en fraguar haciendo posible fundir los 48 cilindros sin que la mezcla pierda manejabilidad. También permitiría mantener la resistencia de diseño de 3000 psi al reducir el agua en la mezcla. Los aditivos usados fueron los siguientes:

#### ***7.2.6.1 Plastificante retardante.***

Para prolongar el tiempo de manejabilidad del concreto y el diseño de mezcla de 3000 psi de Ultracem que preparan para sus mixer, se utiliza un aditivo retardante.



Éste corresponde a la marca comercial Toxement, específicamente al EUCON WR 85, el cual cumple con las especificaciones de la norma ASTM C-494 como Tipo D. La dosificación fue proporcionada por el Departamento técnico de Toxement, teniendo en cuenta las características de los materiales que conforman el diseño de mezcla. Al usar este aditivo, el concreto tardará más tiempo en fraguar, lo que permite un mayor tiempo de manejabilidad para así fundir los 48 cilindros.



*Figura 11. Aditivo EUCON WR 85 empleado.*

#### ***7.2.6.2 Plastificante reductor de agua.***

Para mejorar la trabajabilidad del concreto a la hora de fundir las muestras cilíndricas, se le agregó al concreto un aditivo reductor de agua de alto rango, para así permitir la trabajabilidad mientras mantiene la resistencia a la compresión al reducir la cantidad de agua utilizada en la mezcla, la cantidad a usar de este aditivo está determinada en el diseño de mezcla de la empresa Ultracem, quienes lo utilizan en las mezclas que distribuyen en sus mixer. El aditivo usado corresponde al PLASTOL 7200 ULTRA, igualmente de la marca Toxement. Este aditivo cumple con las

especificaciones de la norma ASTM C-494 como Tipo A y tipo F, y de igual forma su dosificación fue proporcionada por el Departamento técnico de la empresa.



Figura 12. Aditivo PLASTOL 7200 ULTRA empleado.

### 7.3 Diseño y elaboración de mezcla

#### 7.3.1 Diseño de mezcla método ACI.

Con base en la caracterización previa de los materiales a utilizar, se procedió a realizar el diseño de mezcla para una resistencia de 3000 psi por la metodología de la ACI. Este diseño consta de diversas materias primas como el cementante 1 (cemento Ultracem tipo ART estructural), cementante 2 (ceniza, Gecelca S.A.E.S.P), el agregado grueso (grava de  $\frac{3}{4}$ " con procedencia de Ingecost), el agregado fino 1 (arena gruesa con procedencia de Andiminerasls S.A.S), el agregado fino 2 (arena fina de santo Tomás), agua, aditivo 1 (EUCON WR 85 de Toxement) y aditivo 2 (PLASTOL 7200 ULTRA de Toxement).

Primeramente, se definió el parámetro de resistencia para la elaboración del concreto bombeable de 3000 psi con un asentamiento de  $6 \pm 1$ ". Cabe resaltar que el

concreto utilizado en esta investigación fue donado por la empresa Ultracem, como tambien la realización de los ensayos y el diseño de mezcla.

*Tabla 17.*

*Diseño de mezcla de concreto bombeable de 3000psi (Fuente: Ultracem).*

<b>Materias Primas</b>	<b>Cantidad(kg)</b>	<b>Tolerancia (%)</b>
Cemento Ultracem	246	+ / - 4
Ceniza	43	+ / - 4
Arena Gruesa	468	+ / - 3
Arena Fina	468	+ / - 3
Grava TM 3/8"	950	+ / - 3
Agua	165	+ / - 1
Aditivo 1 plastificante	1,44	+ / - 3
Aditivo 2 Superplastificante	2,17	+ / - 3

### **7.3.2 Elaboración de mezclas y preparación de especímenes de concreto**

Después de comprender los parámetros para las dosificaciones de la mezcla de concreto, se procedió a iniciar el proceso de preparación del concreto y la fabricación de cada uno de los especímenes de ensayo.

**7.5.2.1 Equipos y herramientas.**

Los equipos y herramientas, al igual que los materiales, fueron proporcionados por la empresa Ultracem. A continuación, se relacionan los equipos y herramientas empleadas para el desarrollo experimental de la presente investigación:

Máquina mezcladora.



*Figura 13. Máquina mezcladora.*

- Moldes cilíndricos de plástico con dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 de altura, se tuvo en cuenta que los moldes estuvieran en buen estado y no corrieran riesgo de deformarse al momento de fundir.



Figura 14. Moldes cilíndricos de plástico empleados.

Palas para el vaciado del concreto.



Figura 15. Ilustración de pala empleada (tomado de

<https://www.homecenter.com.co/homecenter->

[co/product/148135/Pala-redonda-No-2-con-cabo-68035/148135\)](https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/148135/Pala-redonda-No-2-con-cabo-68035/148135)

- Martillo de caucho para la compactación del concreto.



Figura 16. Martillo de goma empleado (Tomado de

<https://www.homecenter.com.co/homecenterco/product/278734/Martillo-Caucho-F-Vidrio-20onzas-JN4074/278734>)

Varilla de acero.



- 

*Figura 17. Varilla compactadora empleada (Tomado de*

*[https://dimacro.com.co/producto/varilla-](https://dimacro.com.co/producto/varilla-compactadora/)*

*compactadora/*

- Balanza para la toma del peso de los materiales.



*Figura 18. Balanza.*

Cono de Abrams, para la medición del asentamiento del concreto es estado fresco.





*Figura 19. Cono de Abrams, para la medición del asentamiento del concreto es estado fresco.*

- Recipiente y medidor de aire.



*Figura 20. Recipiente y medidor de aire.*

- Herramientas menores: todo tipo de herramientas necesarias a lo largo de la fabricación como pinzas, llaves, etc.



Figura 21. Herramientas menores.

#### ***7.5.2.2 Procedimiento de elaboración del concreto.***

El procedimiento que se ejecutó para la realización del concreto se describe a continuación:

- Se pesaron todos los ingredientes según las cantidades arrojadas por el diseño de mezcla.



Figura 22. Ilustración del pesaje de los materiales utilizados en la mezcla.

Se procedió a depositar los materiales en la máquina mezcladora, adicionando controladamente el agua para así tener una mezcla uniforme.



*Figura 23. Preparación del concreto en la mezcladora.*

- Luego de obtener la mezcla, se procedió a realizar el ensayo de asentamiento con el fin de verificar el parámetro de diseño. Siguiendo el método propuesto por (NTC, 396 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto, 1992).



Figura 24. Ilustración del procedimiento del ensayo de asentamiento.

- Posteriormente se realizó el ensayo de contenido del aire al concreto fresco recién mezclado por el método de presión.



Figura 25. Ilustración del procedimiento del ensayo de contenido de aire.



A continuación, el desmoldante le fue aplicado a los 48 cilindros plásticos para que cuando el concreto pase a su estado endurecido después de fraguar, el proceso de desencofrado no genere afectaciones en las muestras.



Figura 26. Aplicación de desmoldante a los cilindros plásticos empleados.

- Luego se procedió a la toma de muestras, depositando la mezcla previamente preparada en los 48 cilindros con base en lo estipulado en la norma NTC 1377



Figura 27. Elaboración de especímenes de concreto.

- 24 horas después se desencofraron los cilindros con la ayuda de una bomba a presión.



*Figura 28. Ilustración proceso de desencofrado de los especímenes.*

- Después de esto, se procedió a marcar cada uno de los especímenes fabricados (6 para cada técnica), con el fin de facilitar el proceso de identificación al momento de aplicarles las técnicas de curado y después de esto. El proceso de marcado escogido incluía el nombre de la técnica (T1-T8), el ejemplar (1-6) y la fecha a realizarle el ensayo de resistencia a la compresión (a los 7 y a los 28 días).





Figura 29. Demarcación de la técnica 8, cilindro 5 (T85) que fue fallado a los 28 días (28).

La Tabla 18 presenta de forma resumida la descripción de cada una de las 8 técnicas de curado escogidas como objeto de estudio en la presente investigación, así como también una ilustración de las muestras sometidas a cada una de estas técnicas.

Tabla 18.

Técnicas de curado realizadas en la investigación (Fuente: Elaboración propia).

Técnica	Descripción	Desviación estándar a los 7 días
T1	Inundación en agua de grifo	
T2	Inundación en agua de mar	

T3            Inundación en agua de grifo con cal y  
                 control de temperatura



T4            Agente de curado 1 (Tipo 1-D, clase A),



---



T5            Agente de curado 2 (Tipo 1, clase A),



T6            Forrado en polietileno



T7            Rociado manual con agua 2 veces al día



T8            Sin curado



- Después de completar su primera etapa (a los 7 días), se le realizó el ensayo de resistencia a la compresión al primer trío de cilindros de cada técnica (24 cilindros en total) y luego en su segunda etapa (a los 28 días) se ensayaron a los tríos restantes por técnica.



Figura 30. Muestras seleccionadas para la realización de los ensayos a compresión a los 7 días.

#### **7.5.2.3 Realización de ensayos de resistencia a compresión.**

De acuerdo con la metodología descrita para el desarrollo de este proyecto, se evaluó el parámetro de resistencia a la compresión del concreto, por lo que se realizó este ensayo de laboratorio a las muestras fabricadas y curadas previamente, tanto a sus 7 días como a sus 28 días de edad. Para la realización de los ensayos de resistencia a la compresión del concreto, los cuales se realizaron en el laboratorio de calidad de la empresa Ultracem, se verificó inicialmente que las muestras no tuvieran ninguna alteración física como relieves, desniveles o deformaciones que pudieran afectar el área de contacto donde se aplica la carga axial, se verificó el estado de los cilindros y no contaron con deformaciones o alteraciones, encontrándose en buen estado para la realización del ensayo a compresión. Se colocaron individualmente las muestras en el plato dentro de la máquina para ser sometidas a una carga axial a compresión y determinar los valores de resistencia de la muestra siguiendo el método estipulado por la NTC 673. Para este ensayo se utilizó una consola super - automática Automax pro y un bastidor para comprimir los cilindros marca Dirimpex de referencia CT-1500 (Figuras 41 y 42).



*Figura 31. Consola Automax pro.*



*Figura 32. Bastidor para compresión de cilindros CT-1500.*

## 8. Análisis de Resultados

Analizando los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión axial en las muestras de concreto sometidas por el método de la norma técnica colombiana NTC 673, se obtuvieron los siguientes resultados por cada técnica de curado empleada:

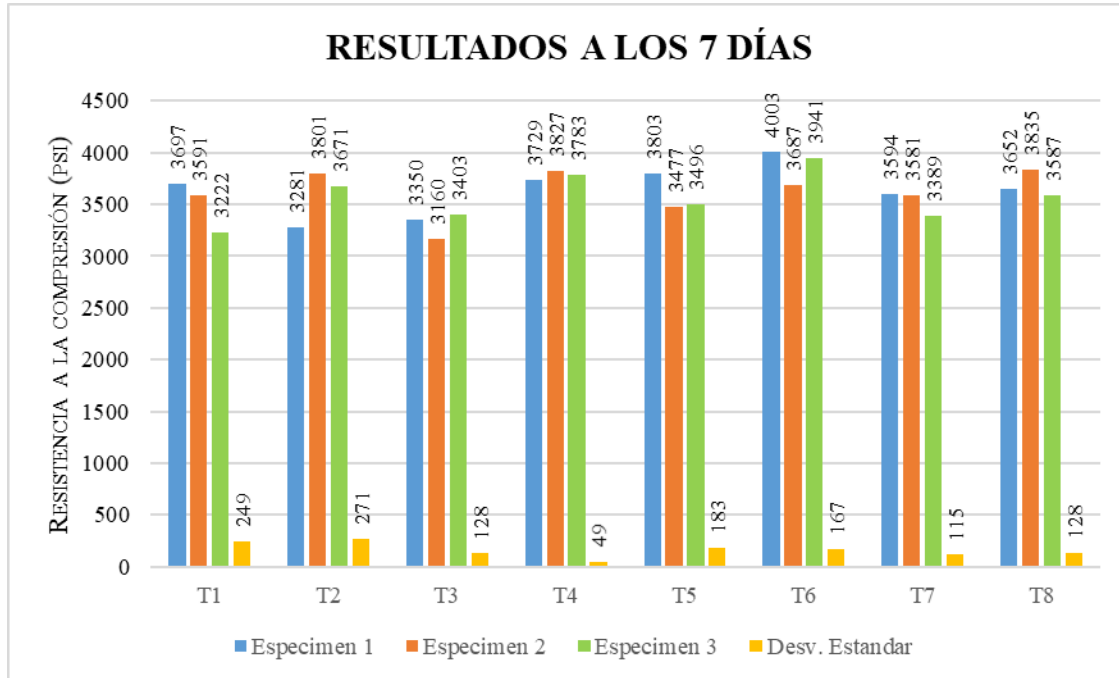


Figura 33. Resistencia a la compresión a los 7 días para cada muestra de cada técnica de curado.

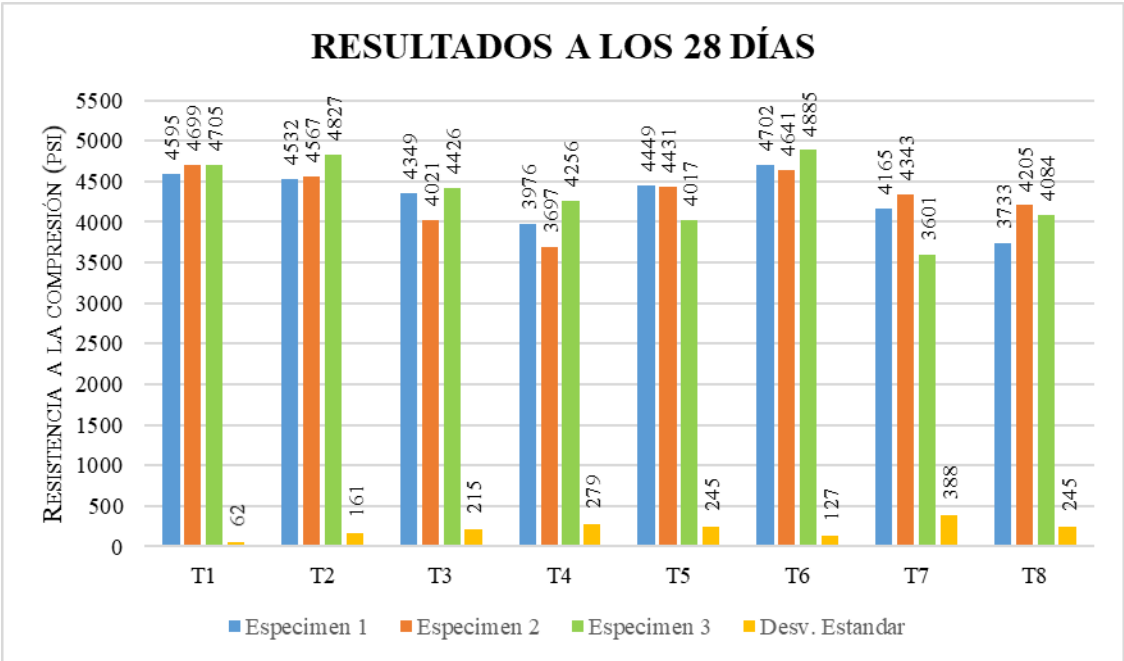


Figura 34. Resistencia a la compresión a los 28 días para cada muestra de cada técnica de curado.

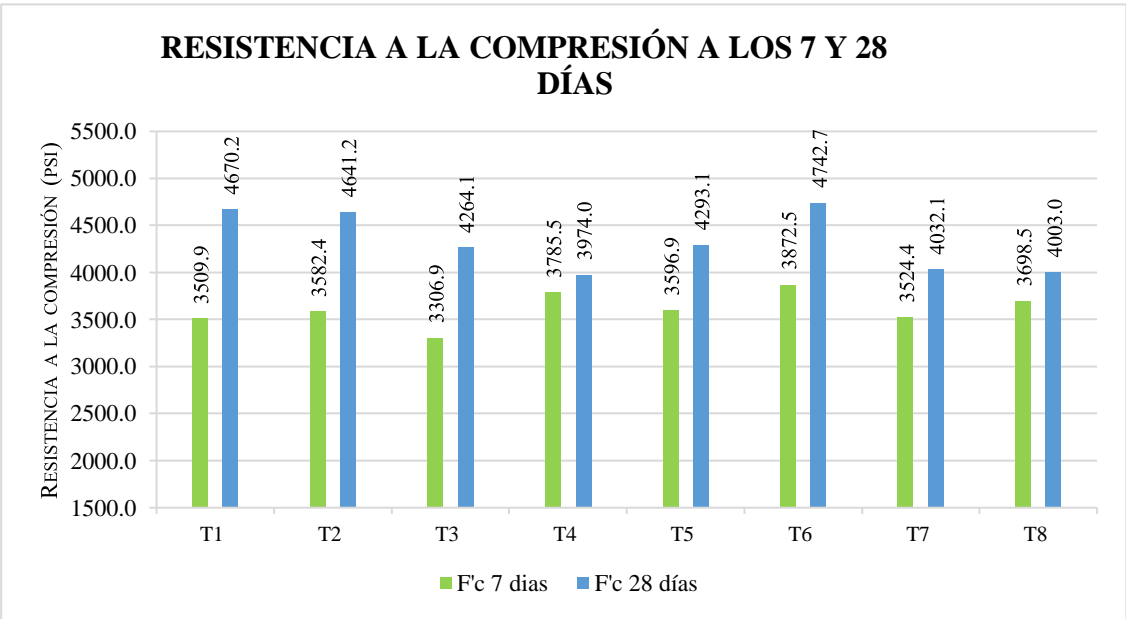


Figura 35. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días para cada técnica.

La norma ACI 214R-11 en la Tabla 4.2 (Standards of concrete control for  $f_c' \leq 5000$  psi), brinda referencias para tener un control de calidad en concretos de 3000 psi dependiendo de la variación estándar, como se muestra en la Tabla 19.

*Tabla 19.*

*Desviación estándar, nomenclatura y descripción de cada técnica de curado (Fuente: Elaboración propia).*

<b>Técnica</b>	<b>Desviación estándar a los 28 días (psi)</b>	<b>Control de calidad a los 28 días según ACI 214R-11</b>
T1	62.1	Excelente
T2	161.2	Excelente
T3	215.0	Muy bueno
T4	279.3	Bueno
T5	244.7	Muy bueno
T6	127.1	Excelente
T7	387.5	Pobre
T8	245.0	Muy bueno

Con base en los resultados arrojados por los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros, los curados por medio de la técnica de inundación desarrollaron una alta resistencia a los 28 días de curado, siendo específicamente los curados bajo inundación en agua de grifo los que alcanzaron los mayores valores de resistencia (entre las tres técnicas de inundación empleadas) y la menor variación estándar entre todas las técnicas de curado realizadas como se

muestra en la Tabla 19. Este resultado obedece al hecho que las muestras se encuentran 100% hidratadas durante toda su etapa de madurez y el agua potable se encuentra libre de impurezas en comparación con el agua de mar y el agua añadiéndole cal.

La técnica de curado establecida por las normas colombianas NTC 3512, las cuales especifican que se deben tener las muestras en agua con cal en una relación 3.0 g/l y a una temperatura controlada de 23 °C, arrojó una resistencia a la compresión promedio de 4265.5 psi a los 28 días, con una desviación estándar de 215.1 psi como se muestra en la Tabla 19. Dentro de las posibles causantes de que los cilindros hayan obtenido estos valores de resistencia a la compresión están el factor de compactación del concreto dentro de los cilindros, la fuerza aplicada en los golpes dados al cilindro durante su elaboración, así como también la metodología utilizada para curar el concreto. Este tipo de errores puede generar burbujas de aire dentro del cilindro que al llenarse de agua tienden a propagarse, afectando la resistencia del cilindro.

Los valores de resistencia de los cilindros curados con un agente de curado vendido en el comercio, denominado en esta investigación como agente de curado No. 1 (Tipo 1-D, clase A), arrojó una resistencia promedio de 3976.3 psi a los 28 días, con una desviación estándar de 279.3 psi, siendo ésta la técnica de curado (de las 8 estudiadas) que menor resistencia a la compresión desarrolló.

El valor promedio de resistencia a la compresión más alto a los 28 días fue el presentado por los cilindros forrados con papel vinipel (polietileno) alcanzando un valor de 4742.6 psi con una desviación estándar relativamente baja (127.1 psi). En comparación con las demás técnicas, es la segunda desviación más baja, esto es que los valores de resistencia se encuentran cercanos al promedio. El polietileno cumple la función de mantener la humedad del cilindro ya que evita

la evaporación del agua que se encuentra dentro de la muestra, manteniendo así el cilindro hidratado y ayudando al concreto a desarrollar sus propiedades químicas durante el proceso de curado.

La técnica de curado que presentó una mayor desviación estándar en los resultados de resistencia fue la que consistía en el rociado manual con agua potable dos veces al día. La principal causante de que la desviación estándar haya tenido este valor considerable puede estar dada por la dificultad de garantizar que el proceso se haga correcta e idénticamente todas las veces en que se realice, al ser un proceso manual. En este caso, la insuficiencia de agua durante el rociado ocasiona que el cilindro no quede totalmente hidratado afectando el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto durante el tiempo de curado.

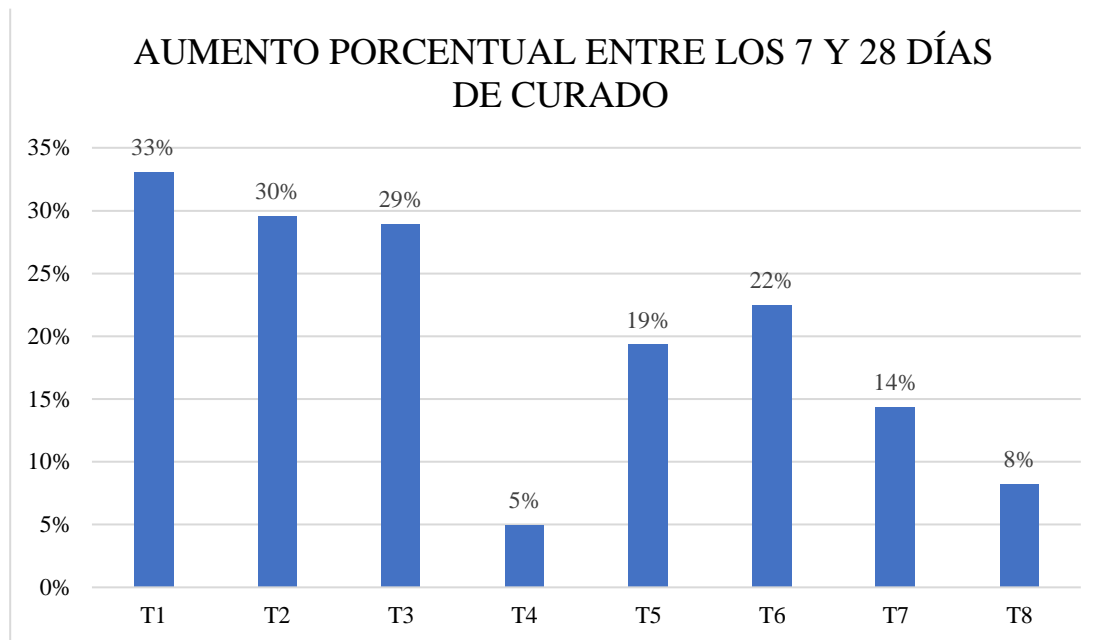
Una de las ventajas que tiene el rociado manual con agua potable es que el agua es un material de fácil acceso y económico en comparación con los agentes de curado los cuales tienen costos considerables, no obstante, los agentes de curado que se venden en el mercado son aplicados solo una vez durante el proceso de madurez del concreto, mientras que el rociado manual debe hacerse varias veces en los días posteriores al fraguado, aumentando significativamente la mano de obra en la construcción.





Figura 36. Resistencia a la compresión a los 28 días para cada técnica vs sin curado a los 28 días.

Los cilindros en los que no se utilizó ninguna técnica de curado desarrollaron una resistencia promedio de 4003.0 psi, esto se da porque durante el aumento de la temperatura las muestras evaporan el agua que tienen en el interior, deshidratándose y afectando el proceso químico del cemento durante el curado. La diferencia de resistencia entre la técnica más alta y la técnica sin curado es de 739.7 psi por lo que realizar un buen curado en el concreto puede traer beneficios para las construcciones.



*Figura 37. Aumento porcentual entre los 7 y 28 días de curado en cada técnica.*

De acuerdo con la Figura 38, las técnicas de curado T1, T2 Y T3 correspondientes a la técnica de inundación de agua de grifo, inundación agua de mar e inundación agua con cal con control de temperatura respectivamente, tuvieron un mayor incremento porcentual debido a que estas técnicas estuvieron 100% hidratadas durante los 28 días. La técnica T6 de forrado en vinipel incrementó después de los 7 días un 22% demostrando con este incremento ser la técnica de mejor resultado. Siguiendo con las técnicas de menor resultado encontramos la de agente de curado 1 (T4) y sin curado (T8), con un incremento porcentual de 5% y 8% respectivamente entre los 7 y 28 días de curado, siendo estas expuestas al medio ambiente llegando a tener un ritmo de evaporación mayor causando una retracción de secado por la pérdida de humedad lo cual produjo una contracción en las muestras generando valores bajos de resistencia.

Continuando con la T3, siendo esta técnica la de inundación en agua con cal y control de temperatura estipulada por la norma, los cilindros presentaron un aumento en porcentaje de un

29% generando una muestra más resistente que las muestras de la T7 (rociado manual), aunque su incremento fue de un 14%, no superando las técnicas de inundación. Se puede decir que las técnicas que generaron mayor incremento porcentual en comparación a las demás fueron las técnicas de inundación T1, T2 y T3, pero aun así no superaron los valores de la técnica T6 forrado en vinipel.

La Tabla 20 representa las fallas de los cilindros de concreto después de la realización del ensayo a compresión, en los cilindros se pueden apreciar las fallas debido a la compresión aplicada sobre estos, la razón por la que se obtuvieron diferentes valores de resistencia y diferentes fallas se encuentra en las microgrietas o espacios con aire dentro del el cilindro, reduciendo la resistencia a compresión del cilindro y variando los tipos de falla obtenidos en el ensayo de compresión.

Tabla 20.

Fallas características de las muestras posterior al ensayo de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días (Fuente: Elaboración propia).

<b>Falla a los 7 días</b>	<b>Falla a los 28 días</b>
---------------------------	----------------------------

**Técnica de curado**

T1



T2



T3



T4



T5





---

---

T6



T7



T8



## Conclusiones

Basados en los resultados obtenidos en esta investigación, se demuestra que los cilindros que se mantuvieron hidratados durante toda su etapa de madurez por medio de las técnicas de inundación en agua de grifo (T1), inundación en agua de mar (T2), Inundación en agua con cal y control de temperatura (T3) y forrado en polietileno (T4) lograron un aumento de su resistencia a la compresión después de los 7 días, en comparación con las muestras que quedaron expuestas al medio ambiente (agentes de curado comerciales, rociado manual con agua dos veces al día y sin curado).

Por otro lado, también se demostró que la técnica de forrado en polietileno comúnmente usada en las obras al momento de curar las columnas e incluso muros, al cumplir con el desarrollo de la resistencia a la compresión durante la madurez del concreto se convierte en una de las mejores opciones al momento de realizar el curado en las obras. De esta forma, se recomienda para climas cálidos implementar la técnica de curado húmedo o forrado en polietileno que a su vez protegen las estructuras de los factores externos que pueden alterar las propiedades del concreto.

A su vez, las técnicas en la que se utilizaron agentes de curado comerciales dieron resultados de resistencia similares a la técnica de rociado manual con agua dos veces al día, esto brinda en las construcciones la posibilidad de elegir entre diferentes técnicas de curado, teniendo en cuenta las ventajas que tiene cada una y las condiciones que hay en la obra tanto económicas como de tiempo y personal de trabajo.

Finalmente, se puede concluir que las técnicas de curado son de suma importancia debido a que estas tienen influencia directa en los parámetros de calidad del concreto tales como la resistencia a la compresión, durabilidad, absorción entre otros. La necesidad de que este proceso



se ejecute de la mejor manera es punto clave para las estructuras de concreto, por este motivo se recomienda seguir realizando estudios y análisis de la implementación de estas técnicas e incluso investigar la influencia que tienen durante la madurez del concreto los materiales usados en la mezcla, como lo son los aditivos o el uso de la ceniza como cementante, para así identificar lo más conveniente para las obras de construcción.

### Referencias

A.L.G, G., C, I., & .Saciloto, F. (2010). Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: A technical and economical feasibility study. ELSEVIER.

Ahmed, M., Serwan, R., Parveen, S., Rawaz, K., & Wael, M. (2021). Journal of Building Engineering. ELSEVIER.

American Concrete Institute. (2011). ACI 214R-11 Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Michigan, Estados Unidos.

Amry, D., Dahlia, P., Hidenori, H., Yasutaka, S., & Daisuke, Y. (2020). Construction and Building Materials. ELSEVIER.

ASTM International. (2009). ASTM C150M-09 Especificación Normalizada para Cemento Portland. West Conshohocken.

ASTM International. (2019). ASTM C 309 Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete. Pensilvania, Estados Unidos.

ASTM International. (2020). ASTM C125-20 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken.

Azhar, G., HamadAnis, A., & Mohamad, A. (2021). Effects of air post curing on recovery of bond strength and elastic modulus of fire-damaged self compacted concrete.

materialstoday.

Berrío, A. (S.f de S.f de 2020). 360 en concreto. Obtenido de Por qué es importante controlar la temperatura y madurez del concreto en la obra:

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/por-que-es-importante-controlar-latemperatura-y-madurez-del-concreto-en-la-obra-1>

Canul, J. A., Moreno, E. I., & Mendoza, J. M. (2016). Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas de concretos hechos con agregado calizo triturado de alta absorción. ALCONPAT, 235 – 247.

Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. Mérida, México: Universidad Autónoma de Yucatán.

Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2005). Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo. Mérida, México: Universidad Autónoma de Yucatán.

Emriye, Ç., Tayfun, U., Barış, Ş., & İlkerBekir, T. (2020). Construction and Building Materials. ELSEVIER.

Gomá, F. (1979). El cemento portland y otros aglomerantes. Barcelona: Editores tecnicos asociados, s.a.

Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rodríguez, I., Rojas, L., & Segura, G. (2011). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. Tecnología en marcha, 82.

Gutiérrez De López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Manizales, Colombia: Universidad nacional de colombia sede manizales.

Hazha, M., Monower, S., Andy, S., & Ana, B. (2020). The influence of incorporating plastic within concrete and the potential use of microwave curing; A review. *Journal of Building Engineering*.

He, Z., Qingbin, L., Rui, M., Lin, Y., Yu, H., & Jinliang, Z. (2020). *Construction and Building Materials*. ELSEVIER.

Heng-lin, L., Cheng-ming, Z., Lei, S., Ying, M., & Chun-hua, X. (2009). *Mining Science and Technology (China)*. ELSEVIER.

HongJae, Y., Sun-Jong, Park, & Yubin, J. (2019). *Cement and Concrete Research*. ELSEVIER.

In, K., Abdul, Q., & Hong, G. (2021). Influence of carbonation curing on hydration and microstructure of magnesium potassium phosphate cement concrete. *Journal of Building Engineering*.

International, A. (2008). *ASTM C-494 Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto*. West Conshohocken.

international, A. (2009). *ASTM C150-09 Especificación Normalizada para Cemento Portland*. West Conshohocken.

INVIAS. (2000). INV E-211-13 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados. Bogotá D.C.

INVIAS. (2011). INV E-233-13 Determinación del contenido de azufre en los agregados pétreos. Bogotá DC.

INVIAS. (2012). IINV E133-13 Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Bogotá D.C.

INVIAS. (2012). INV E-220-13 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. Bogotá DC.

Jinyan, S., Baoju, L., Xiang, W., Jiali, Q., Junyi, J., & Zhihai, H. (2020). Journal of Building Engineering. ELSEVIER.

Joseph P, R., Mounir, K., Hanaa, E., Alaa, B., Zeinab, E., & Mohamed N, A. R. (2020). Construction and Building Materials. ELSEVIER.

linSalman, A., Khan, S., Muhammad, F., Salman, S., & Muhammad, A. (2014). Construction and Building Materials. ELSEVIER.

Lizarazo Marriaga, J. M., & Gómez Cortés, J. G. (2007). Desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a la compresión la resistividad eléctrica del concreto. Ingeniería e Investigación, 12.

NTC. (1992). 396 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Bogotá D.C.: ICONTEC International.

NTC. (1994). 1377 Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. Bogotá D.C.: ICONTEC.

NTC. (1999). NTC 4049 Método de ensayo para determinar cloruros solubles en agua en mortero y concreto. Bogotá DC.

NTC. (2000). 550 Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. Bogotá D.C.: Ministerio de desarrollo economico.

NTC. (2000). NTC 174 Especificaciones de los agregados para concreto. Bogotá D.C.:

Ministerio de desarrollo economico.

NTC. (2006). NTC 98 Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos hasta de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles. Bogotá D.C.:

ICINTEC internacional.

NTC. (2010). 673 Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes de concreto. Bogotá D.C.: ICONTEC.

NTC. (2014). 3512 Cuartos de mezclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos.

Bogotá D.C.: ICONTEC.

Rodgers, L. (17 de diciembre de 2018). BBC news. Obtenido de BBC news:

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>

Selcuk, T., & Volkan, A. (2005). The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete. ELSEVIER.

Seonhyeok, K., Namkon, L., H.K, L., & Solmo, P. (2021). Construction and Building Materials. ELSEVIER.

Stephen, A. (2020). Compressive strength of concrete containing palm oil fuel ash under different curing techniques.

Stephen, A., & Jeffrey, M. (2020). Compressive strength of concrete containing palm oil fuel ash under different curing techniques.

Torres Serrano, G. (2012). Concreto Hidraulico: uso y aplicaciones. Ciudad universitaria

Rodrigo Facio: Universidad de costa rica.

Wu, X., Dong, J., & Tang, M. (1987). Cement and Concrete Research. ELSEVIER.

## ANEXOS

## Caracterización de materiales

PARÁMETRO DE CONTROL	MÉTODO DE ENSAYO	ESPECIFICACIÓN NTC 121	ESPECIFICACIÓN ASTM C 1157	ESPECIFICACIÓN ULTRACEM
Contenido de Aire en volumen, %	NTC 224	Máx. 12,0	Máx. 12,0	Máx. 12,0
Finura (permeabilidad al aire), cm <sup>2</sup> /g	NTC 33	-----	-----	-----
Finura en Tamiz N° 325 (45 m), %	NTC 294	-----	-----	-----
Expansión en autoclave, %	NTC 107	Máx. 0,80	Máx. 0,80	Máx. 0,80
Expansión Barra de mortero, 14 días, %	NTC 4927	Máx. 0,020	Máx. 0,020	Máx. 0,020
<b>TIEMPO DE FRAGUADO (Met. Vicat)</b>				
Tiempo inicial de fraguado, minutos	NTC 118	Mín. 45	Mín. 45	Mín. 45
Tiempo final de fraguado, minutos	NTC 118	Máx. 420	Máx. 420	Máx. 420
<b>RESISTENCIA DE LA COMPRESIÓN</b>				
1 Día MPa (psi)	NTC 220	Mín. 11,0 (1595)	Mín. 12,0 (1740)	Mín. 12,0 (1740)
3 Días MPa (psi)	NTC 220	Mín. 22,0 (3191)	Mín. 24,0 (3480)	Mín. 24,0 (3480)
7 Días MPa (psi)	NTC 220	-----	-----	-----
28 Días MPa (psi)	NTC 220	-----	-----	-----

Figura 38. Ficha técnica del cemento Ultracem (Fuente: Ultracem).

ANÁLISIS QUÍMICOS	METODO DE ENSAYO	ULTRACEM	ASTM C618 CLASE F
Óxido de Silice (SiO <sub>2</sub> ), %	ASTM C114	44,5	—
Óxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	ASTM C114	19,3	—
Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	ASTM C114	14,5	—
% SiO <sub>2</sub> + %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + %Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %		78,2	Mín. 70
Óxido de Calcio (CaO), %	ASTM C114	6,7	—
Óxido de Magnesio (MgO), %	ASTM C114	3,1	—
Óxido de Azufre (SO <sub>3</sub> ), %	ASTM C114	3,2	Máx. 5,0
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O), %	ASTM C114	1,1	—
Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O), %	ASTM C114	1,3	—
Álcalis equivalentes Na <sub>2</sub> Oeq, %	ASTM C114	2,0	—
Pérdidas al Fuego, %	ASTM C114	4,6	Máx. 6,0
Humedad, %	ASTM C311	1,0	Máx. 3,0
ENSAYOS FÍSICOS	METODO DE ENSAYO	ULTRACEM	ASTM C618 CLASE F
Finura en tamiz N° 325 (45um), %	ASTM C430	24,00	Máx. 34,0
Densidad, g/ml	ASTM C188	2,50	—
Expansión por Autoclave (20% de reemplazo), %	ASTM C151		Máx. 0,80
<b>Índice de actividad, %</b>			
7 días, 20% de reemplazo, %	ASTM C311	77,00	Mín. 75
28 días, 20% de reemplazo, %	ASTM C311	80,00	Mín. 75
Requerimiento de agua (20% de reemplazo), %	ASTM C311	104,00	Máx. 105,0

Figura 39. Ficha técnica de la Ceniza (Fuente: Ultracem).



% Passing													
Sample Date	Sample ID	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200	FM	SG	Absorp
	Min Pass	100.0	100.0	95.0	80.0	50.0	25.0	10.0	2.0	0.0			
	Max Pass	100.0	100.0	100.0	100.0	85.0	60.0	30.0	10.0	5.0			
04/11/2020	3030	100.0	100.0	96.5	83.1	73.7	58.9	19.0	4.3	0.4	2.64		1.00
19/11/2020	3055	100.0	100.0	98.5	93.5	57.9	42.4	11.5	3.5	0.1	2.93		1.00

	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200	FM
Count	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
AVG	100.0	100.0	97.5	88.3	65.8	50.6	15.3	3.9	0.3	2.79
STDEV	0.0	0.0	1.4	7.3	11.2	11.7	5.3	0.6	0.2	0.21
Range Min	100.0	100.0	96.5	83.1	57.9	42.4	11.5	3.5	0.1	2.64
Range Max	100.0	100.0	98.5	93.5	73.7	58.9	19.0	4.3	0.4	2.93
COV	0.0	0.0	1.4	8.3	17.0	23.0	34.8	14.5	84.8	7.36

Sin compactar 1528.50 kg/m<sup>3</sup>  
 Absorción 1.0 %  
 Módulo de finura 2.8  
 Pasa Tamiz 200 2.1 %  
 Densidad Aparente 2616.500 kg/m<sup>3</sup>

Figura 40. Características físicas agregado fino (Fuente: Ultracem).

LECTURAS	ENSAYO No. 1	ENSAYO No. 2	ENSAYO No. 3
LECTURA ARENA: LA	103	115	120
LECTURA ARCILLA: LC	152	169	173
EQUIVALENTE DE ARENA= LA/LC * 100	68	68	69
EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO (%)			68

CONDICIONES DE LA MUESTRA  
MUESTRA HUMEDA

☐

SECADA AL HORNO

☒

Figura 41. Porcentaje equivalente de arena agregado fino (Fuente: Ultracem).

Líquido de alta densidad utilizado en el ensayo Cloruro de Zinc en agua densidad 2,00 g/cm<sup>3</sup>  
Metodo utilizado: I.N.V. E-220-13

AGREGADO FINO : DATOS DEL ENSAYO Y CÁLCULOS			
MASA TOTAL DE LA MUESTRA S.S.S. W <sub>2</sub> (g)	MASA PARTICULAS QUE FLOTAN W <sub>1</sub> (g)	MASA MUESTRA SECA (g)	% PARTICULAS LIVIANAS
362,4	0,0	359,2	0,0
% PARTICULAS LIVIANAS L			0,0

Figura 42. Porcentaje de partículas livianas agregado fino (Fuente: Ultracem).

AGREGADO FINO: DATOS DEL ENSAYO Y CÁLCULOS				
TAMAÑO TAMIZ	MASA DE LA MUESTRA DE ENSAY (g) A	MASA DE LA FRACCION DESPUES DE ENSAYO (g) B	MASA QUE PASA EL TAMIZ DESIGNADO (g) C = A - B	PORCENTAJE DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES $D = (C / A) \times 100$
Mayor que 1,18 mm	172,0	169,6	2,4	1,40

Si una fracción contiene menos del 5% en la gradación original, no se ensaya y se considera par el cálculo de su pérdida ponderada, el mismo porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales que el tamaño mayor o menor más próximo.

Figura 43. Porcentaje de partículas deleznales agregado fino (Fuente: Ultracem).



Figura 44. Reactividad potencial agregado fino (Fuente: Ultracem).

% Passing										
Sample Date	Sample ID	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	FM	SG	Absorp
	Min Pass	100.0	90.0	55.0	20.0	0.0	0.0			
	Max Pass	100.0	100.0	85.0	55.0	10.0	5.0			
04/11/2020	3032	100.0	100.0	78.7	29.1	5.0	0.6	6.65		1.70
19/11/2020	3061	100.0	93.5	58.6	22.6	1.1	0.3	6.76		1.40

	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	FM
Count	2	2	2	2	2	2	2
AVG	100.0	96.8	68.7	25.9	3.0	0.5	6.71
STDEV	0.0	4.6	14.2	4.6	2.8	0.2	0.08
Range Min	100.0	93.5	58.6	22.6	1.1	0.3	6.65
Range Max	100.0	100.0	78.7	29.1	5.0	0.6	6.76
COV	0.0	4.8	20.7	17.8	90.4	47.1	1.16

Sin compactar	1424.00 kg/m3
Absorción	1.6 %
Módulo de finura	6.7
Pasa Tamiz 200	1.0 %
Densidad Aparente	2539.000 kg/m3

Figura 45. Características físicas agregado grueso (Fuente: Ultracem).

DATOS DEL ENSAYO					
Norma de referencia	NTC 98				
Gradación usada	B				
No. de esferas	11				
No. de revoluciones	500				
Pa=masa muestra seca antes del ensayo (g)	5000				
Pb=masa muestra seca despues del ensayo y lavada sobre tamiz 1.70mm	3856				
Pa-Pb= perdida	1144				
% desgaste = (Pa-Pb)/Pa	22,9				
Especificación menor de :	40%				

Tamaño del tamiz, mm (aberturas cuadradas)		Masas de los tamaños indicados, g			
Pasa	Retenido en	Gradación			Granulometría
		1	2	3	
75	60	2 500 ± 50	...	...	A
60	50	2 500 ± 50	...	...	
50	37,5	5 000 ± 50	5 000 ± 50	...	B
37,5	25,0	...	5 000 ± 25	5 000 ± 25	
25,0	16,0	...	...	5 000 ± 25	C
TOTAL		10 000 ± 100	10 000 ± 75	10 000 ± 50	

Tamaño del tamiz, mm (aberturas cuadradas)		Masas de los tamaños indicados, g			
Pasa	Retenido en	Granulometría			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	-	-	-
25,0	19,0	1 250 ± 25	-	-	-
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
12,5	8,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
8,5	6,3	-	-	2 500 ± 10	-
6,3	4,75	-	-	2 500 ± 10	-
4,75	2,36	-	-	-	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Figura 46. Ensayo de desgaste agregado grueso (Fuente: Ultracem).

Líquido de alta densidad utilizado en el ensayo Cloruro de Zinc en agua densidad 2,00 g/cm<sup>3</sup>

Método utilizado I.N.V. E-220-13

AGREGADO GRUESO : DATOS DEL ENSAYO Y CÁLCULOS			
MASA TOTAL DE LA MUESTRA S.S.S. W3 (g)	MASA PARTICULAS QUE FLOTAN W1 (g)	MASA MUESTRA SECA (g)	% PARTICULAS LIVIANAS
4637,8	0,0	4635,9	0,0
% PARTICULAS LIVIANAS L			0,0

Figura 47. Porcentaje de partículas livianas agregado grueso (Fuente: Ultracem).

AGREGADO GRUESO: DATOS DEL ENSAYO Y CÁLCULOS								
TAMANO TAMIZ			GRADACION DE LA MUESTRA ORIGINAL (% RET)	MASA DE LA FRACCIÓN ANTES DE ENSAYO (g)	MASA DE LA FRACCIÓN DESPUÉS DE ENSAYO (g)	MASA QUE PASA EL TAMIZ DESIGNADO (g)	Porcentaje de Terrones de Arcilla y P.Deleznables	Porcentaje de T. Arcilla y P.Deleznables Ponderado
mm	a	mm	A	B	C	D = B - C	E = D/B x 100	F = (E x A) / 100
4,75	a	9,5	23,6	1385,2	1384,7	0,5	0,0	0,01
9,5	a	19,0	71,6	4197,8	4196,7	1,1	0,0	0,02
19,0	a	37,5						
Mayor que		37,5						
PORCENTAJE TOTAL DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES = promedio de los porcentajes ponderados								0,01

Si una fracción contiene menos del 5% en la gradacion original, no se ensaya y se considerar par el cálculo de su pérdida ponderada, el mismo porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznables que el tamaño mayor o menor más próximo.

Figura 48. Porcentaje de partículas deleznables agregado grueso (Fuente: Ultracem).

Referencia Muestra	Registro Lbto	Sulfatos-SO <sub>4</sub>	Cloruros-Cl
Mezcla de arena Andimineral-Santo Tomas	13874	0,088 %	0,00020 %
Grava Ingecost	13883	0,712 %	0,00177 %

Figura 49. Contenido de cloruros y sulfatos de agregados finos y gruesos (Fuente: Ultracem).

Preparación de la mezcla y fabricación de especímenes

Descripción	Ilustración
-------------	-------------

---

Materiales para la realización de la  
mezcla, previamente pesados  
siguiendo las especificaciones del  
diseño de mezcla.



Realización del concreto en la  
mezcladora.



Realización de ensayo de  
compactación.



Realización de ensayo de densidad y  
contenido de aire.





Fundida de los cilindros de concreto.



Desenfofrado y marcado de los cilindros según la técnica de curado a la que fueron sometidos.



Cilindros curados por medio de las técnicas agentes de curado, sin curado y forrados en polietileno.



Cilindros curados por medio de las técnicas de inundación.



**Realización de ensayos a compresión y resultados obtenidos**

*Figura 50. Consola y bastidor para compresión utilizado para los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros.*





*Figura 51. Cilindros fallados en el ensayo de resistencia a la compresión.*

**Registro fotográfico**





























